
Charakterisierung und Modellierung von Bauteilfehlern - Qualitätsüberwachung

Bauerdick, Christoph; Fischer, Benjamin; Hahn, Moritz; Knöller, Philipp; Schönherr, Josef;
Abele, Eberhard
23. August 2018



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Kontakt

c.bauerdick@ptw.tu-darmstadt.de

<http://www.ptw.tu-darmstadt.de/> | <http://www.eta-fabrik.de/>

Abstract

Die Qualitätsüberwachung in Unternehmen ist heute von größter Bedeutung. Fehler können in der gesamten Fertigung vom Rohmaterial bis zum fertigen Produkt auftreten. Je später ein Fehler erkannt wird, desto höher sind die Kosten für Nacharbeit oder Ausschuss. Eine Möglichkeit um Fehler bereits frühzeitig zu erkennen, sind Monitoring-Systeme, die die Bearbeitung von Werkstücken überwachen. Kosten für Nacharbeit und Ausschuss können so minimiert werden.

Ziel dieser Veröffentlichung ist die Untersuchung der Eignung maschineninterner Signale (vor allem Sercos-Antriebssignale) zur Fehlstellendetektierung in Bauteilen während des Zerspanungsprozesses.

Die induzierten Fehlstellen, sowie der Verschleiß, können in den Graphen der Auswertung nachgewiesen werden. Ebenfalls zeigt sich, dass nur bestimmte Signale für eine Detektion infrage kommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Urformen	2
2.1.1	Guss- und Gefügefehler	2
2.1.1.1	Angebrannter Sand	2
2.1.1.2	Auswerfermarken	2
2.1.1.3	Ballenabrisse	3
2.1.1.4	Blattrippen	3
2.1.1.5	Brandrisse (Temperaturwechselrisse)	3
2.1.1.6	Carbide	3
2.1.1.7	Chunky-Graphit	4
2.1.1.8	Dross bzw. Krätze	4
2.1.1.9	Fließlinien	5
2.1.1.10	Fließmitteleinschluss	5
2.1.1.11	Flocken	5
2.1.1.12	Formerosion	5
2.1.1.13	Formschalenrisse	5
2.1.1.14	Gasblasen	6
2.1.1.15	Gasporosität	6
2.1.1.16	Gießgrat	7
2.1.1.17	Glanzkohlenstoffeinschluss	7
2.1.1.18	Graphitentartung	8
2.1.1.19	Graphitflotation	8
2.1.1.20	Harte Stellen	8
2.1.1.21	Impfmitteleinschluss	9
2.1.1.22	Kaltlauf	9
2.1.1.23	Kaltrisse	9
2.1.1.24	Kantenhärte	9
2.1.1.25	Kernbruch	10
2.1.1.26	Kommafehler	10
2.1.1.27	Lunker	10
2.1.1.28	Metallische Einschlüsse	11
2.1.1.29	Mikroporosität	11
2.1.1.30	Narbige Oberflächen	12
2.1.1.31	Oberflächenblasen	12

2.1.1.32	Oxideinschlüsse	12
2.1.1.33	Penetration und Explosionspenetration	12
2.1.1.34	Phosphideutektikum	13
2.1.1.35	Pinholes	13
2.1.1.36	Plattenbruch	14
2.1.1.37	Rauher Guss	14
2.1.1.38	Sandeinschluss	15
2.1.1.39	Schaumstellen	15
2.1.1.40	Schichtporosität	15
2.1.1.41	Schlackeeinschlüsse	15
2.1.1.42	Schülpfen	16
2.1.1.43	Schwitzperlen	16
2.1.1.44	Seigerungen	17
2.1.1.45	Spritzperlen	18
2.1.1.46	Treibstellen	18
2.1.1.47	Umgekehrte Weißeinstrahlung	18
2.1.1.48	Ungleichmäßige Härte	19
2.1.1.49	Unvollständig ausgelaufener Guss	19
2.1.1.50	Vererzung	19
2.1.1.51	Versatz	19
2.1.1.52	Verzug	20
2.1.1.53	Warmrisse	20
2.1.1.54	Weißer Belag	20
2.1.1.55	Werkzeugrückstände	20
2.1.1.56	Winkelblasen	21
2.1.1.57	Ziehriefen	21
2.1.2	Sintern	21
2.1.2.1	Blährisse	21
2.1.2.2	Auf- und Abkohlung	21
2.1.2.3	Wechselwirkung von Stickstoff mit Chromstählen	22
2.1.2.4	Anschmelzen mit Kohlenstoff beim Hochtemperaturesintern	22
2.1.2.5	Delamination	22
2.1.2.6	Rost im Pulver	22
2.1.2.7	Sulfidbildung	22
2.2	Umformen	23
2.2.1	Warmumformen	23
2.2.2	Kaltumformen	24
2.3	Fügen	25
2.3.1	Fertigungsbedingte Schweißnahtfehler	25
2.3.2	Werkstoffbedingte Schweißnahtfehler	26

2.4	Stoffeigenschaften ändern	26
2.4.1	Wärmebehandlung	26
2.4.1.1	Härten	26
2.4.1.2	Vergüten	27
2.4.1.3	Glühen	27
2.4.1.4	Thermochemische Diffusion	27
2.5	Trennen	28
3	Auswahl und Klassifizierung der Fehler	29
4	Nachbildung der Fehler	34
4.1	Beschreibung des Probenkörpers	34
4.2	Hohlraum	34
4.3	Einschluss	34
4.4	Materialtrennung	35
4.5	Festigkeitsänderung	35
5	Versuchsdurchführung und -auswertung	36
6	Zusammenfassung und Ausblick	41
	Literatur	V

1 Einleitung

Basierend auf einer ausführlichen Recherche zu in Vorprozessen vorkommenden Bauteilfehlern, werden nachfolgend Versuchsproben entwickelt. Hierzu werden die Fehlerbilder anhand ähnlicher geometrischer und physikalischer Charakteristiken in vier verschiedene Kategorien klassifiziert. Für die Arbeit relevante Fehler werden in Proben exemplarisch nachgebildet. Während der Zerspanung der Proben werden 20 potentielle maschineninterne Signale betrachtet und aufgezeichnet. Die aufgenommenen Signaldaten werden mithilfe von Matlab auf die Identifizierung von Fehlstellen untersucht und diskutiert.

Das Vorgehen lässt sich in fünf Hauptarbeitsschritte gliedern, siehe Abbildung 1.1. Ziel dieser Arbeit ist eine Voruntersuchung der Eignung von achsenbezogenen Sercos-Parametern für die Detektion von Werkstückfehlern.



Abbildung 1.1 – Arbeitsschritte

2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird eine Recherche zu Fehlern in typischen Vorprozessen der Zerspanung, sowie ein Überblick zu auftretenden Fehlern in der Zerspanung selbst gegeben.

2.1 Urformen

Der erste Abschnitt befasst sich mit den Fehlern, die beim Urformen entstehen können. Dabei wird auf Fehler, die beim Gießen oder Sintern entstehen können, eingegangen.

2.1.1 Guss- und Gefügefehler

Es folgt eine Zusammenstellung der Fehler, die in Gussverfahren entstehen können. Der Fokus liegt hierbei auf der Beschreibung des Fehlerbildes in Verbindung mit seinen quantitativen Ausprägungen, sofern Angaben in der Literatur gemacht werden.

2.1.1.1 Angebrannter Sand

Bei angebranntem Sand kommt es zu einem Ansintern der an die Schmelze angrenzenden Formsandschicht. Hierbei gelingt es dem flüssigen Metall, die Sandkörner zu binden. Es bilden sich anhaftende Sandstellen oder auch ein vollständiger Überzug mit großer Rauheit. Die klare Abtrennung zu anderen Oberflächenfehlern ist erschwert. Hauptursache ist die chemische Reaktion von Gießwerkstoff und Formstoff, begünstigt durch eine oxidierende Atmosphäre; vor allem wenn die Bildung von Glanzkohlenstoff nicht ausreichend gegeben ist. Die Dicke der aufragenden Sandschicht befindet sich unterhalb der der Penetration.

[5, S. 11 ff.] [31, S. 25 ff.]

2.1.1.2 Auswerfermarken

Dieser Fehler tritt ausschließlich bei Druckgussteilen auf. Verursacht wird er durch verschlissene oder schlecht ausgerichtete Auswerferstifte. Im Falle eines Bohrungsverschleißes können die entstandenen Auswerfermarken einen Metallgrat an der Oberfläche ausbilden, der auf ein Anschweißen des Gussteils an die Stifte hinweist und den Verschleiß weiter verstärkt. Andernfalls kann sich der Fehler auch in einem Eindruck der Auswerferstifte im Gussteil zeigen oder aber als Überstand auf dem Gussteil. In jedem Fall ist der Gebrauch von Auswerferstiften auf der Gussteiloberfläche sichtbar. Über den Fehlerumfang unzulässiger Auswerfermarken macht die Literatur keine Angaben.

[31, S. 27 f.]

2.1.1.3 Ballenabrisse

Man kann hier auch vom Formenbruch sprechen. Ein Fehler, der bei allen bentonitgebunden Sandformgüssen auftreten kann. Dabei sind Verhältnisse von Tiefen zu Breiten von Formelementen wie Stegen und Ähnlichem und eine zu hohe Verdichtung des Formstoffes oft ausschlaggebend. Der Abriss entsteht, wenn die Zugfestigkeit des Trennwiderstandes des Ballens überschritten wird. Oft sind nach einem Guss die abgerissenen Ballen von der Schmelze umschlossen und bilden einen massiven gratartigen Einschluss. Bei der Formerstellung kann dieser Abriss durch bereits kleinstes Kippen des Formkastens entstehen. Aber auch beim Befüllen des Formkastens kann es beispielsweise örtlich zu einem Sandunterschuss kommen, der später den Ausgangspunkt eines Formenbruchs und damit eines möglichen Abrisses bildet. Ballenabrisse sieht man oft als Füllungen von vorgesehenen Hohlstellen im Gussteil mit grober Oberfläche. Sie stellen letztendlich Aufmaße zum Gusstück dar, deren Umfang und Auftreten nicht sicher vorhersagbar ist. [5, S. 15 ff.] [31, S. 29 ff.]

2.1.1.4 Blattrippen

Siehe Abschnitt 2.1.1.42 zu Schülpen.
[31, S. 33 ff.]

2.1.1.5 Brandrisse (Temperaturwechselrisse)

Fehlerbild von Kokillen- und Druckgussformen, bei denen häufige Temperaturwechsel ein ganzes Netzwerk an Rissen auf der Oberfläche entstehen lassen. Diese Risse bilden sich auf dem Gussteil durch verzweigte, feine Grate ab. Für das Gussteil bedeutet dies nur ein verschlechterter optischer Eindruck der Bauteiloberfläche. Entscheidend für diese Art Spannungsrisse sind die Verweildauer auf Höchsttemperatur, die Geschwindigkeiten des Temperaturwechsels, der Aufheizung und der Abkühlung. Und natürlich die Eigenschaften des Formwerkstoffes, die der Spannungsrissebildung entgegenwirken.

Es kann aber auch zu Ausbröckelungen kommen. Dies betrifft vor allem gasnitrierte Stähle mit martensitischem Gefüge, bei denen sich spröde Ausscheidungen im Bereich der Korngrenzen gebildet haben. Diese setzen die Duktilität bei Temperaturwechselbeanspruchung herab. In der Folge kommt es zu interkristallinen Brüchen im nitrierten Oberflächenbereich, wobei wiederum einzelne Körner freigegeben werden können.

Die Ausmaße des zusätzlichen Grats am Gussteil können beispielhaft der folgenden Quelle entnommen werden. Sie betragen ca. 0,3 - 2 mm.

[31, S. 38 ff.]

2.1.1.6 Carbide

Unabhängig von Form- und Gießverfahren kann dieser Fehler alle Eisen-Kohlenstoff-Legierungen betreffen. Die daraus resultierenden Einschlüsse erschweren die Bearbeitbarkeit und führen zur Herabsetzung der mechanischen Eigenschaften, vor allem zu deutlich verschlechterten Zähigkeitseigenschaften. Carbide als

Metall-Kohlenstoffverbindungen können zum Beispiel als Eisen-, Misch-, Doppel- oder Sondercarbid in den Fehlerbildern Kantenhärte/Weißeinstrahlung oder umgekehrte Weißerstarrung vorliegen. Ihr Aussehen ist im ersteren Fall faserförmig oder fleckig, sie können aber auch als zuletzt erstarrtes Korngrenzencarbid „zwickelförmig“ vorliegen oder sogenannte „Chinesenschrift“ und mit Titan quaderförmige Einschlüsse bilden.

Entscheidend für die Carbidbildung ist die Erstarrung im Zusammenhang mit den eutektischen Temperaturen für das stabile und metastabile System. Ausgangspunkt bilden die Probleme der Keimbildung der Graphitphase. Es kann hier zu einer ausgeprägten Unterkühlung unter die eutektische Temperatur des stabilen Systems kommen. Bei hoher Abkühlungsgeschwindigkeit ist es daher möglich, dass auch die eutektische Temperatur der metastabilen eutektischen Temperatur unterschritten wird und es zu einer ersten Weißerstarrung wie im Fall von Kantenhärte kommt. Durch die freiwerdende Wärme der eutektischen Reaktion können die Restschmelzetemperaturen wieder über die des metastabilen Systems steigen. Dadurch wird die Carbidbildung und damit die Weißeinstrahlung unterbrochen. Die Restschmelzenerstarrung erfolgt dann zwischen den eutektischen Temperaturen.

Dieses Erstarrungsende kann aber auch unterhalb der eutektischen Temperatur des metastabilen Systems liegen. Die hierbei entstandenen Carbide lagern sich an den bereits bestehenden Körnern an. Es bildet sich auf diese Weise Korngrenzencarbid. Dieses stellt somit eine Seigerungsfolge dar.

Für weitere Informationen zu den Legierungseinflüssen wird auf die Literatur und für die Fehlerausmaße auf die Carbid zugehörigen Fehlerbilder verwiesen.

[31, S. 43 ff.]

2.1.1.7 Chunky-Graphit

Chunky- oder Graupelgraphit kann bei dickwandigen Gussstücken aus Kugelgraphitgusseisen vorliegen. Die betroffenen Bereiche zeichnen sich durch eine sehr langsame Abkühlung aus. Er nimmt starken Einfluss auf die Werkstoffduktilität. Optisch zeichnet sich Chunky-Graphit durch dunkle Flecken in einem korallenförmigen Verbund aus. Großgewachsene Graphitkugeln liegen dabei oft gebrochen in Sektionen vor.

Zunehmende Gehalte von Silicium, Nickel, Calcium, Kupfer und Cer begünstigen das Fehlerbild. Quantitative Angaben zum Duktilitätseinfluss werden nicht gemacht. Ein Beispiel für die Größe einer gebrochenen Graphitkugel kann der folgenden Quelle entnommen werden. Sie beträgt ca. 0,2 mm. Betroffene Bereiche können mehrere Quadratzentimeter groß sein.

[31, S. 60 ff.]

2.1.1.8 Dross bzw. Krätze

Dross stellt Metallschlacken und oxidierte Einschlüsse dar, die die häufigste Fehlerursache hochwertiger Gussteile und Gusseisen mit Kugelgraphit darstellen. Diese sind dann zumeist Oxideinschlüsse oder Silikatschlacken von MgO, MgS und MgAl. Sie kommen in der Größenordnung eines Millimeters zumeist sehr nahe der Oberfläche unter der Gushaut zu liegen und treten oft mit Verzunderungen auf. Der Literatur kann eine meist längliche Anordnungen der Dross-Schlackehäutchen entnommen werden, deren Breite 0,05 - 1 mm aufweisen. [47, S. 11.2–12, 11.2–39, 11.2.1–18, 11.2.1–19] [31, S. 68 ff.]

Nach Campbell [14, S. 20, 53 f.] unterscheidet sich dieser Fehler nur insofern von einem reinen Schlackeeinschluss, dass hier die hochviskose Gushaut (als sogenannter *Bifilm*) Schmelze einkapselt. Weitere Größenangaben werden nicht gemacht.

2.1.1.9 Fließlinien

Zu niedrige Form- und Schmelztemperaturen in Verbindung mit zu langen Formfüllzeiten können zu Fließlinien führen. Begünstigt wird ihre Entstehung durch Gase oder Luft im Formhohlraum im Zusammenhang mit dem Trennmittel und durch eine ungünstige Gestaltung des Anschnitts. Fließlinien bilden eine Vorstufe zu Kaltfließstellen (siehe auch Kaltlauf, im Abschnitt 2.1.1.22), treten aber nur an Oberflächen auf und sind entfernbar. Der nachfolgenden Literatur kann eine ungefähre Breite von ca. 0,2 mm für Fließlinien entnommen werden.

[31, S. 75 ff.]

2.1.1.10 Fließmitteleinschluss

Fließmittelzugaben bestehen in den meisten Fällen aus Fluoriden und Chloriden und sollen die Eigenschaften der Schmelze verbessern. Diese unlöslichen und niedrigviskosen Bestandteile sollen im Laufe des Erstarrungsprozesses aufsteigen. Sie können aber von Oxidhautlagen/Dopplungen gefangen werden und wirken für diese adhäsiv und damit der Ausbildung von Porositäten entgegen. Werden sie an der Oberfläche geöffnet und der Umgebungsluft ausgesetzt, bilden sie korrosive Lokalelemente.

[14, S. 32 ff.]

2.1.1.11 Flocken

Als Flocken werden Ansammlungen von Wasserstoff bezeichnet. Diese treten bei größeren Gussteilen auf. Sie sammeln sich vor allem in austenitischen Gebieten, die diese besser gelöst haben. Der Wasserstoff senkt die Austenitumwandlung stark herab bis auf 200 °C, wodurch es zu Abkühl- und Umwandlungsspannungen kommt. Die Flocken führen hierbei vor allem zu sehr feinen Spannungsrissen, die, wenn sie nicht aufgeweitet vorliegen, kaum zu detektieren sind. Im Verlauf des Betriebslebens des Fertigteils bilden sie den Ausgangspunkt für Risse. Diese haben eine Breite unter 1 µm und Längen von ca. 50 µm.

[41, S. 322 ff.]

2.1.1.12 Formerosion

Siehe Abschnitt 2.1.1.38 zu Sandeinschluss.

[31, S. 77 ff.]

2.1.1.13 Formschalenrisse

Dieser Gussfehler betrifft nur keramische Formschalen beim Feinguss. Es bilden sich, Blattrippen ähnlich, rippenartige Ansätze als feine metallische Auswüchse im Falle von Anrissen und somit Grate auf dem

Gussstück. Im Falle eines Durchrisses der Schale bricht diese und es kommt zum Schmelzenaustritt. Die Ursachen hierfür können sich aus der Schlickercharakteristik, der Trocknung, das Auswachsen, im Rahmen des Brennens und beim Abguss ergeben. Die Rissentstehung in Formschalen ist schwierig quantifizierbar. [31, S. 83 ff.]

2.1.1.14 Gasblasen

Gasporen sind sphärische Hohlräume infolge der Gasbildung in der Schmelze, die sich an der Oberfläche sammeln und für gewöhnlich geschlossen sind. Sie können auch bei Schweißprozessen entstehen. Gasblasen gehen oft mit Schlacken, Oxiden oder Schweißperlen einher. [47, 11.1-18 und 19]

Oft wird auch unterschieden in Gasporosität und Gasblasen, wie es zum Beispiel Hasse vornimmt [31, 88 ff. und 102 ff.]. Gasblasen können in vier Kategorien nach dem Entstehungsmechanismus bzw. den -quellen eingeteilt werden. Demnach gibt es Gasblasen, entstehend aus dem in der Schmelze befindlichen gelösten Gas, dessen Löslichkeit während der Erstarrung fällt, Gasblasen aufgrund von Schmelzen- und Formstoffreaktionen, Gasblasen aufgrund eines Mitreißens beim Gießen durch eine turbulente Befüllung (engl. *entrainment*) und schließlich Kernblasen beim Formguss. Die Gaslöslichkeit ist temperaturabhängig und weist im Erstarrungsintervall eine hohe Bandbreite auf. Die Größenordnung der Gasblasen kann nach Campbell [14, S. 448] nach dem Gesetz für ideale Gase berechnet werden. Blasen, die groß genug sind, steigen auf und verlassen das Gussstück, dabei erzeugen sie Strömungsbewegungen in der Schmelze. Bei ungenügendem Flüssigkeitsdruck kann auch ein Einschluss unter der Oberfläche [47, S. 11.1–18] erfolgen oder das Gas in einer Trennung/Dopplung gefangen werden [14, S. 448].

Kleinere Gasblasen werden während des Erstarrungsvorgangs eingeschlossen und weisen neben einer globalen Gleichverteilung eine Konzentration in der Nähe der Ränder auf [14, S. 463].

Zusammengefasst listet Tabelle 2.1 die Phänomene mit ihrer Verteilung und den geometrischen Ausmaßen an.

Bei idealer Speisung, also dem Ausbleiben von Lunkern, ist nach Campbell [14, S. 661] eine hohe Gasblasenporosität mit 2 % und eine mittlere verbleibende mit 1 % angegeben.

Nach Doege und Behrens [26, S. 497] wird eine Gesamtporosität von 2 % von Lunkern und Gasblasen in Gussteilen angegeben.

Pinholes bilden einen Sonderfall der Gasblasen [31, S. 231].

2.1.1.15 Gasporosität

Im Gegensatz zu Gasblasen, die eher bei Eisengusslegierungen zu finden sind, tritt Gasporosität bei Magnesium-, Aluminium-, Kupferlegierungen und Stahlguss auf, bevorzugt bei Gussteilen nach dem Druckgussverfahren. Gasporosität geht oft mit anderen Porositäten aus Schwindungsvorgängen, Mikrolunkern, Oxideinschlüssen und ähnlichem einher. Betroffen sind Metallegierungen mit breitem Erstarrungsintervall oder schlechtem Fließvermögen, bevorzugt an Stellen von Materialanhäufungen. Es handelt sich bei ihnen um gleichmäßig verteilte, kugelige Poren mit blanker Oberfläche, die von den dendritischen Oberflächen der Lunker unterschieden werden müssen. Gasporosität beeinflusst die Dichtheit und die mechanischen Eigenschaften des Gussstücks negativ.

	Intrinsic (metallurgical defects)		Extrinsic (entrained casting defects)	
	Gas from solution in melt	Gas from mold reaction	Entrained air bubbles	Core blows
Spatial distribution	Uniform throughout casting	1–2 mm under surface	Clustered above ingates	Uniform depth under cope
Size (mm)	0.05–0.5	0.05–0.5	1–5	5–500
Features	Associated with bifilms in suspension in melt	Associated with bifilms in suspension in melt	Associated with oxides (solid oxides include bifilms + bubble trails) (liquid oxides include slags)	Connected by bubble trail to originating core

Tabelle 2.1 – Verteilung und Größe von Gasblasen [14, S. 462]

Während des Erstarrungsvorgangs sinkt die Schmelztemperatur und die Gaslöslichkeit geht dementsprechend zurück. Gas, welches hierbei nicht entweichen kann, wird vom Gussteil eingeschlossen. Für weitere Ursachen wird auf die Literatur verwiesen. Beispielhafte Durchmesser der Porosität von 0,03 mm bis 0,2 mm können der Literatur entnommen werden.

[31, S. 102 ff.]

2.1.1.16 Gießgrat

Beim Gießgrat bildet sich eine zum Gussteil senkrecht stehende, zumeist dünne Metallrestfläche aus. Raum bieten dem Grat Formteilungsbereiche, Passfugen von Kernen oder auch Kernmarken. Er muss von Blattrippen unterschieden werden. Die Entstehungsursachen sind verfahrensabhängig. Alle Formwerkstoffoberflächen, die zueinander schlecht gearbeitet wurden, Druckstöße bei Druckguss oder Verzug bieten Ausgangspunkte für Grate.

Grate sind insofern problematisch, als sie die Rissgefahr erhöhen und oft mit Fehlerbildern wie Aufhärtungserscheinungen und Weißeinstrahlung einhergehen.

[31, S. 136 ff.]

2.1.1.17 Glanzkohlenstoffeinschluss

Für diesen Gussfehler ist ein Überschuss an Glanzkohlenstoffbildnern Voraussetzung. Diese sind Kohlenwasserstoffverbindungen, die sich während des Gießvorgangs verflüchtigen und dabei eine kohlenstoffübersättigte Atmosphäre um 650°C bilden. Dieser pyrolitische Kohlenstoff bildet als Glanzkohlenstoff dünne Kohlenstoffhäute, die zur Bildung von Schlieren, dünnwandigen flächigen Einschlüssen und Materialtrennungen führen, die häufig im Gegensatz zu oberflächigen Benetzungen nicht sichtbar sind. Die geometrischen Dimensionen dieser Glanzkohlenstoffhäutchen variieren stark. Sie reichen von Breiten von ca. 20 µm bei Längen von bis zu 600 µm bis zu Längen von über 15 mm. Die Glanzkohlenstoffeinschlüsse zeigen hier ein ebenso uneinheitliches Bild mit Bereichen bis 0,3 mm Durchmesser, die in der Länge Ausdehnungen von bis zu 1,5 mm annehmen können.

[5, S. 33] [31, S. 109 ff.]

2.1.1.18 Graphitentartung

An Gussstücken aus GJS (Gusseisen mit Kugelgraphit) kann je nach Verlauf der Erstarrung und Gussteilgröße nahe der Oberfläche eine entartete Graphitschicht, mit Dicken von 0,2 mm bis 1 mm, vorgefunden werden. Bei größeren Gussstücken und schwefelreichen Formstoffen können Randentartungen noch bis einige Millimeter unter der Oberfläche auftreten. Auslösemechanismus ist das Vorhandensein von Reaktionspartnern für in der Schmelze enthaltenes Magnesium. Diese Reaktionspartner liegen bei Formverfahren vor allem als Schwefel in der Form und Sauerstoff in der Formoberfläche vor. Für die Bildung des Kugelgraphits ist aber ein Mindestbestandteil an Magnesium erforderlich, der in der Oberfläche aufgrund des Entzugs unter 0,015 % fällt. Dass die Graphitentartung auf die Betriebsfestigkeit Einfluss hat, gilt als unbestritten. Die Herabsetzung von Dehnung, Schlagzähigkeit und Zugfestigkeit ist die Folge und ab einer Gesamtmenge von 10 % können sich diesbezüglich wesentliche Einbußen bemerkbar machen. Wie groß jedoch der quantitative Einfluss auf Festigkeits- bzw. Härteänderung durch dieses Phänomen ist, darüber gibt die Literatur keinen Aufschluss.

[5, S. 37 ff.] [31, S. 114 ff.]

2.1.1.19 Graphitflotation

Bei übereutektischen Gusseisen mit Kugelgraphit kann es zu einem Seigern von Graphit kommen, der Primärkugelgraphit bildet. Aufgrund der geringeren Dichte steigen diese Kugeln auf und sammeln sich im oberen Teil des Oberkastens oder auch unterhalb von Kernen. Folge ist eine gestörte Dichtspeisung und inhomogene Zusammensetzung des Gussstücks. Die Bereiche des flotierten Kugelgraphits sind gut mit bloßem Auge zu erkennen. Ein anschließendes Strahlputzen des Gussteils kann zum Aufreißen der Graphitkugeln und damit zu einer narbigen Oberfläche führen.

[31, S. 133 ff.]

2.1.1.20 Harte Stellen

Bei harten Stellen oder auch harten Einschlüssen handelt sich um oftmals ausgeseigerte oder ausgeschiedene Einschlüsse mit unregelmäßiger Gestalt. Sie besitzen eine besonders hohe Härte, die den Werkzeugverschleiß in der spanabhebenden Bearbeitung erhöht oder auch zum Werkzeugbruch führen kann. Bei den Einschlüssen kann es sich um Zementit, Korund, Si-Primärkristalle, Carbide, Aluminium-Mangan-Eisen- und -Chrom-Verbindungen und weitere mehr handeln.

Harte Stellen haben einen schwerwiegenden Einfluss auf das Gefüge. Dieser Einfluss vermindert die statischen und dynamischen Eigenschaften des Gussteils. Grob sind harte Stellen in metallische und nichtmetallische Einschlüsse zu unterscheiden. Zu finden sind diese Fehlerbilder in den entsprechenden Abschnitten zu Seigerungen, Oxideinschlüssen, Oxidhäuten, als vorliegende Ansammlungen von Carbiden und Weißeinstrahlung/Kantenhärte.

[31, S. 139 ff.]

2.1.1.21 Impfmittleinschluss

Impfen bezeichnet allgemein eine Stoffzugabe, die die Keimbildung und somit das Erstarrungsverhalten beeinflusst. Bevorzugter Gebrauch liegt bei Gusseisen und dient der Grauerstarrung und der Verhinderung von Weißaustrahlung (ledeburitisches Gefüge). Impfmittleinschlüsse treten im Inneren des Gussstückes auf und entwickeln Größen weniger Mikrometer. Sie stellen ihrer Zusammensetzung nach Schlacken dar. Ihre Form ist schlierenähnlich. Sie sind mit Graphitentartungen und Gasblasen vergesellschaftet. Die Einschlüsse setzen die mechanischen Eigenschaften herab. So weist ein Beispiel aus der Literatur an benachbarten Stellen von weniger als 0,5 mm desselben Gussstücks Mikrohärtigkeit HM 25 von 195 bis 600 auf.

[31, S. 149 ff.]

2.1.1.22 Kaltlauf

Bei Kaltlauf wird synonym auch von Kaltschweißstelle, Kaltguss und bei Druckgüssen von Kaltfließstellen gesprochen. Ausgangspunkt eines Kaltlaufs (englisch *cold lap*, *cold shut*) ist eine zu frühe Erstarrung von Teilen der Schmelze, sodass hier Fronten aufeinandertreffen, die sich nicht mehr vollständig verbinden, und somit Trennungen/Dopplungen bilden. Es kann hierbei auch zu einer im Gussteil innen liegenden Hohlraumbildung (sogenannten Fenstern), mäanderförmigen Schichtungen oder Fehlstellen an der Oberfläche kommen. Ursache kann auch ein gebildeter örtlicher Überdruck oder zu geringe Gasdurchlässigkeit der Form sein. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass dieser Fehler infolge zu früher Erstarrung, durch zu niedrige Gusstemperatur, zu lange Fließwege, unzureichende Entlüftung und Gasdurchlässigkeit, zu langsame Gießgeschwindigkeit beziehungsweise -höhe und zu niedrige Formtemperatur das Gussteil sehr stark beeinträchtigen kann. Und auch der Umfang in Größe und Häufigkeit des Fehlers kann nicht abgeschätzt werden, bewegt sich aber zumeist im Bereich von mehreren Millimetern. Die Literatur gibt hier eine Vielzahl von Fehlerbildern wieder. Von großen Hohlräumen, über Schieferungen an der Oberfläche und Kaltfließstellen, mit Abmaßen von 0,5 cm bis 7 cm.

[31, S. 157 ff.] [47, S. 2.1-16/20/24] [14, S. 57 ff.]

2.1.1.23 Kaltrisse

Wie auch Warmrisse sind Kaltrisse Materialtrennungen die von der kristallinen Ebene bis zur kompletten Zerstörung des Werkstückes reichen können [40]. Auch sie treten an Stellen mit hoher mechanischer Spannungskonzentration, hervorgerufen durch Schwindungsvorgänge, auf [14, S. 496]. Im Gegensatz zu Warmrissen liegt die Temperatur jedoch unter der Solidustemperatur, weshalb der Kaltriss transkristall verläuft, also quer durch Körner [48, S. 288]. Nach Campbell [14, S. 496] sind Abgüsse, mit auf heutigen Erfahrungen erstellten Speisern und Angussystemen, nicht rissempfindlich.

2.1.1.24 Kantenhärtung

Kantenhärtung oder auch Weißaustrahlung tritt bei Gusseisen mit Kugel-, Lamellen- und Vermiculargraphit auf. Besonders betroffen sind dünnwandige Stellen, Kanten und Ecken. Es ist in diesen Bereichen eine

Weißerstarrung zu beobachten, die sich durch hohe Härte gegenüber dem restlichen Gefüge auszeichnet. Die Erstarrung ist in einem solchen Fall teils nach dem metastabilen System mit weißen und dem stabilen System mit den grauen Bereichen erstarrt. Es handelt sich bei den weißen Anteilen hier um Ledeburit. Durch einen zu schnellen Abkühlungsvorgang bei beispielsweise geringer Wanddicke oder auch durch ungünstigen Keimhaushalt ist es möglich, dass die Kristallisation erst unterhalb der eutektischen Temperatur des metastabilen Systems einsetzt. Die hierbei freiwerdende Schmelzwärme ermöglicht dann eine erneute Temperaturerhöhung mit Erstarrungsende im grauen Bereich. Im Gegensatz zur Korngrenzencarbidbildung erfolgt die Weißerstarrung hier vor dem Erstarrungsende. Den Beispielbildern folgend erstrecken sich die Anteile der Weißeinstrahlung über mehrere Millimeter der Querschnitte von Bruchflächen und Schliffbildern.

[31, S. 167 ff.]

2.1.1.25 Kernbruch

Kernbruch zeigt sich durch von Kernstücken verschlossenen Hohlräumen, mit Bruchfläche versehen oder an mit Schmelze vollgelaufenen Hohlräumen. Da Kernen höhere Anforderungen an Maß- und Gestaltgenauigkeiten auferlegt sind, sind ihre Eigenschaften entscheidend. Für weitere Informationen hierzu wird auf die Literatur verwiesen. In der Regel bedeutet ein Kernbruch also den Verschluss eines Hohlraums oder das Eindringen und den Verschluss im Gussteilinneren von Kern-Formstoff in unvorhersehbarem Ausmaß.

[31, S. 172 ff.]

2.1.1.26 Kommafehler

Bei Kommafehlern handelt es sich um bis zu 2 cm tiefe Rissstrukturen mit einer möglichen Breite im Umfang von mehreren mm, die an ihrer Oberfläche eine Dendritenstruktur aufweisen. Die Häufigkeit dieses Fehlerbildes steigt mit dem Stickstoffgehalt der Gusseisenschmelze und steigender Wandstärken. Ausgelöst wird die Rissstruktur durch Gasausscheidungen von Stickstoff und Wasserstoff im Verlauf der Erstarrung. Nach Rossmann [47, S. 11.2.1–4] kann hierbei auch von einem offenen Lunker gesprochen werden. Kommafehler und Pinholes teilen somit die gleiche Entstehungsursache und sind lokal oft gemeinsam anzutreffen.

[5, S. 42 ff.] [31, S. 174 ff.]

2.1.1.27 Lunker

Lunker stellen Schrumpfporosität aufgrund fehlender Restschmelze im Zuge der Erstarrung dar. Ihre Struktur ist für gewöhnlich dendritisch (Tannenbaumstrukturen). Unterschieden wird grundsätzlich in Makro- und Mikrolunker. Oft treten diese nicht einzeln auf, sondern es bilden sich Lunkerfelder, die durch rissartige Öffnungen miteinander verbunden sein können. Bevorzugte Bereiche für das Auftreten sind bei Formguss Dickungen. Da es sich bei Lunkerbildung um einen Effekt in Folge der Erstarrung handelt, sind diese meist durch die Gushaut verdeckt und eher seltener offen liegend. Die Lunkerkhäufigkeit kann

in drei Bereiche geteilt werden: hohe Porosität mit 6-12 Vol.%, niedrige mit 1-4 % und Werkstoff ohne nennenswerte Porosität (Heißisostatisches Pressen). [47, S. 1-18 f., S. 2.2-15, S. 3-13]

Lunker können unterschiedliche geometrische Formen annehmen (z.B. Fadenlunker infolge ungenügender Speisung/ungünstiger Gießparameter, die wie ein oxidierte Riss erscheinen und wirken). Mit der geometrischen Form variieren auch die Lunkergrößen. Typische Durchmesser reichen von 0,1 - 1 mm. [6, 88 f.]

Die Ausbildung von Makro- und Mikrolunkern sind sehr vom Erstarrungsverhalten abhängig. Makrolunker weisen gussteilabhängige Größen von mehr als 1 cm aufwärts auf [31, 192 ff.]. Sie können als Fadenlunker oder Röhrenlunker bis zum Blockfuß reichen [6, S. 88]. Bei günstiger Einstellung kann das Innendefizit (die für die weitere Nutzung des Werkstoffs bedeutenden Lunker) gegenüber der technischen Volumenänderung mit 11 - 13 Vol.% klein gehalten werden. [13, S. 17, S. 31 f., S. 104]

In Doege und Behrens [26, S. 497] wird exemplarisch angegeben, dass Lunker und Poren im Gusshalbzeug 2 Vol.-% ausmachen.

Mikrolunker stellen oft schwammartig aufgelockertes oder mikroporöses Gefüge an Gussstellen dar, die spät erstarren. Sie treten in Bereichen von Materialanhäufungen, Waddickenübergängen und in Anschnittnähe (Schmelzezuläufe) auf. Auslöser können zu große Erstarrungsintervalle und zu viel gelöstes Gas sein. Die Beschreibung als Mikrolunker wird nach dieser Quelle nur vorgenommen, wenn Schwindung die Ausbildung der Hohlräume dominiert. Sonst wird von Gasporosität gesprochen. Unter Mikrolunker fallen auch interkristalline Hohlräume, die nicht mehr gespeist werden können. Die Größe kann auf 0,1 mm bis 0,5 mm (Durchmesser hin zu Länge) abgeschätzt werden.

[5, S. 47]

2.1.1.28 Metallische Einschlüsse

Metallische Einschlüsse oder Ausseigerungen sind Fehler, die die spanabhebende Bearbeitung erschweren oder gar zum Werkzeugbruch führen können oder nach Poliervorgängen unerwünschte Muster zeigen. Sie treten nicht nur im Gussteil auf, sondern sind schon im Schmelz- oder Gusstiegel vorhanden und entstehen bevorzugt beim Nachsetzen neuer Blöcke. In den wenigsten Fällen handelt es sich um reine Metallpartikel, sondern um Mehrstoffverbindungen. Die für die Bildung der metallischen Einschlüsse erforderlichen Ausseigerungen entstehen bei zu tiefen Badtemperaturen. Entscheidend sind Temperaturgradient und ungenügende Schmelzekapazität. Hinzukommt die Legierungszusammensetzung mit den je eigenen Seigerungs-faktoren. Beispielhaft ist ein metallischer Einschluss mit einer Mikrohärtigkeit im Bereich von 800 bis 1000 einer eisenhaltigen Aluminium-Mehrstoffverbindung.

[31, S. 195 ff.]

2.1.1.29 Mikroporosität

Siehe hierzu in Abschnitt 2.1.1.27 unter Lunker nach.

[31, S. 199 ff.]

2.1.1.30 Narbige Oberflächen

Es handelt sich hierbei um Kraterbildung in Folge lokal überhitzter Partien. Die flächigen oder vereinzelten Fehlstellen treten bevorzugt bei betonitgebundenem Sand in Kombination mit Fluoriden, oft vergesellschaftet mit Graphitentartung und Oxideinschlüssen, auf. Ausgangspunkt ist die Zerstörung der schützenden Magnesiumoxidschicht, sodass Wasserdampf mit dem Magnesium der Schmelze reagieren kann. Der Umfang der Kraterbildung umfasst ca. 0,5 - 1 mm Durchmesser und Tiefe auf der Oberfläche. Nach Hasse [31, S. 343] wird dieser Fehler auch unter dem Namen weißer Belag geführt. [5, S. 54 ff.] [31, S. 343 ff.]

2.1.1.31 Oberflächenblasen

Oberflächenblasen treten einzeln oder in Gruppen mit zumeist glatter Wandung auf. Häufig befinden sie sich im Oberkasten einer Form. Dort findet man sie in schlecht entlüfteten Taschen und Hinterschneidungen. Ihre Entstehung wird verursacht durch eine mangelnde Entlüftung über die Formhohlräume. Für Näheres siehe auch Abschnitt 2.1.1.14 zu Gasblasen. Beispielhaft sind in der Literatur Einzelblasen mit 3 mm und verzweigte Blasen mit einer Ausdehnung von bis zu 16 mm abgebildet. [5, S. 58 ff.]

2.1.1.32 Oxideinschlüsse

Es handelt sich bei Oxideinschlüssen um nichtmetallische Oxide, die oft mit Gasblasen einhergehen. Oxideinschlüsse sind am metallographischen Schliffbild oder an der Oberfläche auftretend mit freiem Auge zu erkennen.

Sie gelangen als feine Oxidhäute in das Gussinnere. Campbell [14, 24 ff.] gibt für einzelne Oxidhäute (englisch *bifilm*) eine Dicke von 20 nm an. Nach Rossmann [47, S. 11.2–10] können auch größere Oxidhäute über viele Millimeter auftreten und zum unerwarteten Bruch führen. Da sie unlöslich sind, führen sie zu einer lokalen Unterbrechung des Gefügeverbands. Dementsprechend werden Dehnung, statische und dynamische Festigkeitseigenschaften negativ beeinflusst. Sauerstoffaffine Legierungsbestandteile bilden bevorzugt diese unlöslichen Oxidfilme. Ursächlich für die Einschlüsse im Gussteil sind unsachgemäßes Gießen in Verbindung mit turbulenter Formfüllung, sowie eindringende Fremdkörper und mitgerissener Sand und für Abtrennvorgänge zu schwere und zu leichte nichtmetallische Stoffe. Ausgangspunkt der Oxide können auch Reaktionen von Schmelzebestandteilen mit allen am Guss beteiligten Gefäßen sein. Oxide stellen eine der wichtigsten Verunreinigungen im Falle des Stahlguss dar und stehen in engem Zusammenhang mit der Desoxidationsbehandlung. Der angegebenen Literatur können Einschlussgrößen von ca. 0,1 - 0,5 mm entnommen werden. [31, S. 213 ff.]

2.1.1.33 Penetration und Explosionspenetration

Bei der Penetration können durch Überwindung des metallostatistischen Druckes von der Metallschmelze gekapselte Sandschichten in der Dicke wenigstens mehrerer Sandkörner in die Oberfläche gelangen. Bei

Reaktion von Schmelze und Formstoff liegt Vererzung andernfalls Penetration (explosiv erfolgend auch Explosionspenetration) vor.

Im Regelfall bildet sich eine Rauheit oberhalb der Größenordnung der verwendeten Sandkörner (in der Größenordnung eines einzelnen Korns handelt es sich um Rauhen Guss). Betroffen sind Bereiche starker Aufheizung oder schlecht verdichteten Formsandes.

Wie beim rauhen Guss ist für die Ursache das Wechselspiel von metallostatischem Druck, der Formstoffkapillarität für die Entgasung, die Benetzbarkeit und die Oberflächenspannung des Metalls im Rahmen des Gleichgewichts an der Grenzfläche verantwortlich. Bei Explosionspenetration tritt noch ein zusätzlicher Gasdruck auf. Denn ergänzend zu den bei der echten Penetration auftretenden Belastungen, kommt es hier zu einer explosiven Verdampfung von Wasser beim Zusammentreffen von flüssiger Schmelze und nasser Formwand. Bei diesen Gasstößen erstarrt das in die Formhohlräume eingedrungene flüssige Metall in Kürze und unter Einschluss dabei auftretender Gasblasen. Daher geht Explosionspenetration oft mit Gratbildung einher. Häufig ist dieser Fehler in zuletzt gefüllten Formhohlräumen anzutreffen. Das Fehlerbild ist sehr flächig und oft mit einer Schalenbildung verbunden.

Über Eindringtiefe, Häufigkeit und Verteilung dieses Fehlerbildes macht die Literatur keine Angaben. Allerdings können aus Schliffbildern der Quellen beispielhaft Größen der Penetrationsschichten mit Dicken von 0,25 mm bis 0,5 mm und für die Eindringtiefe eine obere Schranke von 15 mm (in Abhängigkeit vom Penetrationsdruck) entnommen werden.

[5, S. 26 ff., S. 64 ff.] [31, S. 220 ff.]

2.1.1.34 Phosphideutektikum

Durch höhere Phosphorgehalte bildet sich in grauen Gusslegierungen Phosphideutektikum, auch Steadit genannt. Erst wenn Steadit vereinzelt und nicht mehr als Netzwerk vorliegt, wird von einem Fehler gesprochen. Oft liegt es als ternäres Phosphideutektikum von Eisenphosphid, Eisencarbid und Austenit vor. Die Erstgenannten harten Bestandteile verbessern das Verschleißverhalten des Gusseisens. Aber eben nur in der Anordnung eines gleichmäßigen Netzwerkes.

Das ternäre Phosphideutektikum entsteht aus der Phosphorseigerung und erstarrt zum Schluss des Erstarrungsvorgangs in der Restschmelze, wodurch die Netzwerkstruktur zu erklären ist. Im Schliffbild zeigt es sich als Phase des Gefüges. Neben der steigenden Verschleißfestigkeit des Phosphors und dem Gebrauch als Fließmittel wirkt er sich versprödhend auf den Gusswerkstoff aus. Bei Kugelgraphit kommt es zur Verminderung der Zugfestigkeit und Dehnung. Quantitative Angaben werden hierzu nicht gemacht. Vereinzelt in der Literatur dargestellte Steaditausbildungen haben eine Größe von ca. 0,04 mm.

[31, S. 227 ff.]

2.1.1.35 Pinholes

Pinholes oder auch Nadelstichporosität oder Randblasen können einzeln oder auch in Gruppen, meist entfernt vom Einguss, auftreten und sind spätestens nach der mechanischen Bearbeitung mit dem Auge sichtbar. Betroffen sein können Kugel-, Vermicular- und Lamellengraphit, sowie Temper- und Stahlguss. Es handelt sich bei Pinholes um Poren oder auch kleine Gasblasen mit metallisch blanker, kugelig oder auch graphitfilmüberzogener Bläschen. Dazu gehören auch oberflächennahe oder -offene Porositätsenden

mit unregelmäßigen Hohlräumen mit Schlacken und Oxidationserscheinungen. Unterschieden werden Pinholes in Wasserstoff- und Wasserstoff-Stickstoff-Pinholes und CO-Schlackenreaktion-Pinholes. Bei Ersteren reagiert Wasserdampf mit den Eisenbegleitern der Schmelze an der Oberfläche und es bilden sich daraus Metalloxide und atomarer Wasserstoff, der in die Schmelze zurückdiffundiert. Bei Letzteren geschieht dies in ähnlicher Weise. Als zweiter Schritt reagieren die frisch gebildeten Metalloxide mit dem Kohlenstoff der Schmelze unter Bildung von CO, das Ausgangspunkt für Mikroblasenbildung ist. Abschließend als Synthese des Vorangegangenen kommt es mit dem Eindiffundieren von Wasserstoff und Stickstoff in diese Mikroblasen zum gesteigerten Blasenwachstum. Die Durchmesser der in der Literatur dargestellten Pinholes reichen von 0,2 - 5 mm.

[31, S. 231 ff.] [5, S. 70 ff.] [14, S. 314, 419, 459]

2.1.1.36 Plattenbruch

Plattenbruch oder auch Schieferbruch ist Folge einer gestörten Gefügeausbildung bei Gusseisenkugelgraphit. Der ungleichmäßigen Härte ähnlich ist das Auftreten eines Plattenbruchs spontan. Als mögliche Ursachen werden vor der Erstarrungsfront sich anreichernde magnesium- und aluminiumhaltige Sulfidsammlungen angesehen. Auch ausgeseigte Silicium-, Magnesium- und Aluminiumoxide in Richtung der Erstarrungsfront werden in Betracht gezogen.

Plattenbruch weist zumeist ein fehlerhaftes Bruchgefüge auf. Erkannt werden kann er oft dadurch, dass sich der Speiserhals leicht abschlagen lässt. Dabei ist am schieferartigen Bruchbild eine schräg (ca. 15°) angeordnete Plattenschichtung zu erkennen, die mit kleinen Graphitkugeln in zeilenweiser Anordnung durchsetzt ist. In diesem Gefüge werden gehäuft auch ein großer Anteil an Einschlüssen und ein gesteigerter Anteil an Silicium vorgefunden. Es handelt sich um einen Fehler in den Größenordnungen der Gefügeebe (ca. 0,05 mm Durchmesser der Graphitkugeln) mit sehr starkem Einfluss auf die dynamischen Eigenschaften und möglichem Bruch als Folge. Weitere quantitative Angaben sind in der Literatur nicht zu finden.

[31, S. 224 ff.]

2.1.1.37 Rauher Guss

Der rauhe Guss bildet eine Vorstufe zu angebranntem Sand, Penetration und der Vererzung. Im Gegensatz zu angebranntem Sand treten nur einzelne eingeschlossene Sandkörner auf. Das Fehlerbild besteht durch eine gegenüber der mittleren Rauheit gesteigerte Rauheit, die sich dadurch ergibt, dass die Metallschmelze sich an die oberste Sandschicht anschiebt und dabei Rillen oder Eindrücke in den Sandkornzwischenräumen bilden. Die Eindringtiefe der Schmelze in die erste Sandschicht ergibt sich aus einem Gleichgewicht zwischen metallostatischem Druck und der Benetzbarkeit, den Kapillarkräften des Formstoffes infolge erforderlicher Gasdurchlässigkeit und der sich einstellenden Oberflächenspannung.

[5, S. 84 ff.] [31, S. 248 ff.]

2.1.1.38 Sandeinschluss

Beim Gießvorgang können Partien und Bereiche des Formsands abgetragen werden und in das Schmelzeninnere eingezogen werden. Bevorzugt als Ausgangspunkte hierfür sind Hinterschneidungen und Kanten. Der Einschluss kann durch und nahe der Oxidhaut erfolgen, die den Formsand durch ihre Viskosität am Aufschwimmen hindert. Formüberstände liefern einen entsprechenden Hinweis auf vorliegende Sandeinschlüsse. Sie treten auch oft zusammen mit Blasen und Schlackeneinschlüssen auf. Auch abgerissene Schülpfen können den Ausgangspunkt für diese Art von Einschluss bilden. Ihre Größe umfasst ca. 6 mm oder auch beispielhaft als einzelnes Korn 0,2 - 0,4 mm. Der Fehler firmiert auch unter Formerosion oder einfach Erosion im Falle von vorbeifließendem, abtragendem Metallschmelzestrom, und bei einzelnen Körnern spricht man von Ausspülungen.

[14, S. 40 f.] [5, S. 21 ff., 92 ff.] [31, S. 77 ff.]

2.1.1.39 Schaumstellen

Bei Schaumstellen handelt es sich um nichtmetallische Einschlüsse bei Eisenlegierungen, die in Folge ihrer geringeren Dichte aufschwimmen und sich unter Kernen, Formvorsprüngen oder am oberen Ende der Form sammeln. Seiner Zusammensetzung nach handelt es sich um Schlacke. Schaumstellen sind oft vergesellschaftet mit Mikrolunkern, Gasporen und Mangansulfideinschlüssen. Zudem weist das Schaumstellen-Gefüge Anreicherungen von Mangan, Schwefel und Sulfid auf. Ihre Form ist rund oder schlierenartig und mit bloßem Auge zu erkennen. Dem Erscheinungsbild nach handelt es sich um einen Schlackeeinschluss. Einen Sonderfall der Schaumstellen bilden die Schlackenflecken an der Oberfläche. Bei ihrer Entfernung kann sich eine narbige Oberfläche ausbilden. Es gibt keine quantitativen Angaben zum Phänomen. Die hieraus resultierenden narbigen Oberflächen können deutliche Hohlräume mit Durchmessern von 0,4 mm, umgeben von narbigem Gewebe, aufweisen. [31, S. 253 ff.]

2.1.1.40 Schichtporosität

Schichtporosität ist ein Fehler, der bevorzugt bei Druckgussstücken aus Magnesiumlegierungen vorliegt. Diese Legierungen ermöglichen in diesem Verfahren sehr flächige, dünnwandige Gussteile, die allerdings oft zeilenförmige Trennung in Richtung der Formfüllung aufweisen. Diese, oft mit Rissen, Gasporen und Mikrolunkern vergesellschafteten Trennungen können vollständig und flächig vorliegen. Ursächlich ist die schnelle Abkühlungsgeschwindigkeit aufgrund der Dünnwandigkeit mit der frühen Erstarrung der Gushaut. In Betracht kommen aber auch eine ungenügende Formtemperatur, Seigerungsvorgänge und ein zu dünner Anschnitt. Beispielbilder liefern mit 0,05 mm dicken Materialtrennungen von mehreren Millimetern Länge einen Eindruck dieses Fehlerbildes.

[31, S. 257 ff.]

2.1.1.41 Schlackeeinschlüsse

Schlacken sammeln sich im Verlauf des Gießvorgangs in der Regel auf Grund der geringen Dichte auf der Schmelze des Gussstücks, aber manchmal jedoch auch im Inneren. Dabei bilden sie nichtmetallische

Einschlüsse, die durch Turbulenz der Schmelze einge­zo­gen werden und Korngrenzen im Gefüge oder auch Gasblasen ausfüllen. Hierunter fallen neben Schlacken auch Oxide in Folge der Reaktion mit Formsand oder entsprechenden Zusätzen wie Impfmittel oder Legierungsbestandteile. Hauptquelle für die Schlackenbildung ist aber immer noch die Reaktion mit Luftsauerstoff. Schlackeneinschlüsse treten oft vergesellschaftet mit Gasblasen auf. Körnige Schlacken, die sich an der Schmelzebadoberfläche bilden, werden als Krätze bezeichnet und vor dem Gießen abgezogen. Zu genauen Größen liefert die Literatur keine Angaben. Beispiele weisen Durchmesser von ca. 1/10 mm bis 20 mm auf.

[5, S. 96 ff.] [31, S. 259 ff.]

2.1.1.42 Schülpen

Beim Gießvorgang wird die formgebende Oberfläche des Formsandes sehr schnell erhitzt. Hierbei treten zwei Effekte auf, die zur Abtrennung der schmelzenahen Formsand-Schicht führen können. Zum einen rekondensiert Wasser in entfernter gelegenen Schichten und erschafft somit einen bindungsgeschwächten, überfeuchteten Bereich. Zum anderen wirkt sich die Quarzausdehnung aus. Diese führt zu Druckspannungen in der Formoberfläche und ist der Ausgangspunkt für die Schalenbildung, die die flächigen, metallischen Ansätze bildet. Folge davon ist eine Zugspannung zwischen Schale und dem dahinterliegenden, kühleren Sandballen. Die Ablösung beider voneinander wird dann durch den Formstoff entschieden. Die Fehlerneigung wird daher über das Verhältnis von Druckspannung zu Nasszugfestigkeit beschrieben. Kommt es zur teilweisen Loslösung ganzer Schichten, dann kann es dazu kommen, dass diese aufgerissen in die Schmelze geraten und flächige Sandeinschlüsse bilden, während die Schmelze den freigegebenen Raum einnimmt. Daher kann das Bauteil im Nachhinein größere Abmaße haben. Hierbei bilden sich je nach Gießvorgang und -Form unterschiedliche Fehlerbilder aus, die als Schülpen, Rattenschwänze oder auch als Blattrippe bezeichnet werden. Sie sind mit bloßem Auge erkennbar. Über das zu erwartende Ausmaß macht die Literatur zwar keine exakten Angaben, die Fehler haben aber in allen Beispielen wenigstens Umfänge von 1 cm und mehr, und die Breite der Fehler wird mit bis zu mehreren Millimetern angegeben.

[5, S. 102 ff.] [6, S. 90] [31, S. 270 ff.]

2.1.1.43 Schwitzperlen

In allen Arten von Hohlräumen und an der Gussteiloberfläche anzutreffende und festverbundene, perlenförmige Ausschwitzung. Der Fehler ist bei allen Gusslegierungen mit niedrigschmelzenden Bestandteilen möglich. Schwitzperlen unterscheiden sich zum übrigen Gussteil durch die Zusammensetzung der Gefügebestandteile. Im Falle von Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL) beispielsweise bildet Phosphideutektikum einen Großteil des Gefüges und man verwendet hier auch die Bezeichnung Phosphidperlen. In anderen Fällen kommt es zu anderen legierungsspezifischen Anreicherungen.

Es handelt sich um eine Form der Makroseigerung (siehe auch Abschnitt 2.1.1.44 zu Seigerung). Die Druckseigerung, die zur Perlenbildung führt, findet nach der Erstarrung der Grundmasse statt. Die in diesem Stadium einsetzende Gasblasenbildung hilft, die niedrigschmelzenden Bestandteile an die Gussteiloberfläche zu befördern, wo sich diese Form der Restschmelze in Gestalt eines benetzenden Tropfens

im Schwindungshohlraum von Gussteil zu Form festsetzt. Das einzige in der Literatur vorgefundene Beispielbild weist einen Durchmesser von 20 mm auf. [31, S. 278 ff.]

2.1.1.44 Seigerungen

Seigerungen sind Ansammlungen von Verunreinigungen beziehungsweise Verarmung oder Anreicherung von Legierungsbestandteilen, die auf die Erschmelzung zurückgehen. Diese Legierungsbestandteile können beispielsweise Oxide, Nitride, Carbide oder auch Carbonitride sein. [47, S. 11.1–15]

Als Entmischungsphänomene werden Seigerungen auch nach Größe und Entstehungsmechanismus in Blockseigerung, Kristall-/Mikroseigerung und Gasblasenseigerung eingeteilt. Ausgangspunkte der Bildung sind Abweichungen vom Gleichgewicht und unterschiedliche Abkühlungsgeschwindigkeiten. Die hieraus resultierenden kristallisierenden Teilchen führen zu einer Anreicherung von Legierungsbestandteilen und Verunreinigungen in der übrigen Restschmelze und damit in Folge der gerichteten Erstarrung zur globalen Blockseigerung. Diese hat eine innenliegende Seigerungszone und einen außenliegenden verunreinigungsarmen Randbereich. Die klare Trennung kann von Gasblasen und in ihrem Gefolge von Strömungen und Umwälzungen in der Schmelze durchbrochen werden und so ein anderes Fehlstellenbild liefern. Im Verlauf der Erstarrung kann es auch aufgrund der Dichteunterschiede zwischen Primärkristallen und Restschmelze zur Schwereseigerung kommen. [6, S. 87]

Mikroseigerungen ergeben sich als Gefügeentartungen zwischen bereits dendritisch ausgebildeten Kristallen als Kristall- und Korngrenzenseigerung [31, S. 282 ff.].

Für Mikroseigerung gibt *Campbell* [14, 241 ff.] Größen von 10 μm bis 100 μm und für die unvermeidlichen Makroseigerungen 1 cm bis zu 1 m an. Sogenannte Weiße Flecken (englisch. *White Spots*) spielen als Seigerungserscheinung bei zum Beispiel Superlegierungen eine große Rolle. Bei diesen Seigerungen handelt es sich beispielsweise um Carbonitrid-Seigerungen mit Größen im Millimeter-Bereich, die durch das Schmelzbad zunächst treiben und bei der Erstarrung eingelagert werden. Diese Art von Seigerungen können als Mikro- oder als Makroseigerungen, oft in Form als ringsförmige Strukturen (englisch *Tree Rings*) als Folge des Gießvorgangs beschrieben werden. Weiße Flecken können nur sehr schwierig auf ihren Betriebseinfluß beurteilt werden. Die Erscheinungen der Weißen Flecken werden unterschieden in diskrete, dendritische und Erstarrungs-White Spots ohne Verunreinigung und diskrete und dendritische White Spots mit Verunreinigungen (englisch *Dirty White Spots* [DWS]). Verunreinigungsfreie White Spots weisen eine Verarmung an Kohlenstoff, Carbiden und Legierungsbestandteilen wie Nb, Ti und Al, mitunter auch Mo, verunreinigte eine Anreicherung von Carbiden, Nitriden und Oxiden auf. Seigerungen vom diskreten Typ sind mehrere Millimeter große, klar zu erkennende Flecken. Es wird im Fall ohne Verunreinigung ein potentieller Festigkeitsabfall von ca. 20 % angegeben. Nach Jackman [34, S. 155] ist hier ein Härteabfall über 30 % möglich. Die Härte eines White Spots nimmt zu seiner Mitte hin ab. Über die Größe des Härteabfalls bei White Spots vom dendritischen und Erstarrungs-Typ werden keine genauen Angaben gemacht.

Gegenüber Dirty White Spots sind Erstarrungs- und dendritische White Spots nahezu unbedenklich. Ausreichend große Fehlstellen der Dirty White Spots vom diskreten und dendritischen Typ gehen zumeist mit einem Riss und einer deutlichen Reduzierung der Schwingfestigkeit einher.

Die Entstehung verläuft folgendermaßen: Es kommt im Schmelzbad zum Absinken verarmter Partikel mit höherer Schmelztemperatur und höherer Dichte. Diese erreichen dann die Erstarrungsfront des Blocks

(englisch *Ingot*) (auch für Nitride und Oxide gültig). Hierbei wird vermutet, dass es sich bei den Dirty White Spots wahrscheinlich um Elektrodenmaterial handelt, das in die Schmelze fällt (zum Beispiel im Vakuumlichtbogenverfahren). Erstarrungs-White Spots treten nur im Halbring für ein sehr flaches Schmelzbad auf.

[47, S. 11.1–29, 11.1–30, 11.1–31, 11.1–37]

2.1.1.45 Spritzperlen

Spritzperlen ergeben sich aus einer unruhigen Formfüllung. Sie sind perlenförmige Einschlüsse, die lose mit dem umgebenden Metall verbunden sind, oder selbst eingeschlossen wurden. Ursache hierfür ist die schnelle Abkühlung der Spritztropfen und die zusätzliche Kapselung durch eine Oxidhaut. Im Gegensatz zu Schwitzperlen ist das Gefüge gleich dem der Restschmelze. Allerdings weicht die Graphitbildung auf Grund der schnellen Abkühlung ab. Zu genauen Größenangaben werden in der benutzten Literatur keine Angaben gemacht.

[31, S. 296 ff.]

2.1.1.46 Treibstellen

Treibstellen zeichnen sich durch Maßungenauigkeiten durch Formwandbewegung aus. Sie treten bei Sandformgüssen und Gussteilen auf, die mittels Maskenformverfahren hergestellt werden. Häufig betroffen sind Gusseisenwerkstoffe, Stahlguss und Schwermetallguss. Oft treten Treibstellen mit rauher Oberfläche, Penetration oder angebranntem Sand auf. Treibstellen weisen massive Verdickungen im Bereich aller Oberflächen oder auch Kanten auf. Ursächlich ist die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung und -strahlung des Gussmetalls auf den Formstoff. Die dadurch induzierten Wärmespannungen führen zur Verformung der Formoberflächen. Überschreitet diese bestimmte Grenzen für den Formzusammenhalt, können sich hieraus zum Beispiel Schülpen ergeben. Auch nicht optimal verdichtete Bereiche können den Fehler aufweisen. Über den Fehlerumfang machen die genutzten Quellen keine exakten Angaben.

[5, S. 110 ff.] [31, S. 297 ff.]

2.1.1.47 Umgekehrte Weißeinstrahlung

Andere Benennungen sind umgekehrter Hartguß oder Inverse Chill. Es handelt sich um einen Fehler, der auch unter Abschnitt 2.1.1.6 Carbide einzuordnen ist. Was ihn jedoch besonders macht, ist dass dieser Fehler ausschließlich in dickwandigen, runden oder Kugelgeometrien von Gussteilen mit langen Erstarrungszeiten auftritt. Betroffen hierbei von weißen Flecken oder Melierungen ist nur der Kern. Es kommt zu harten, schwer zu bearbeitenden Stellen, die die dynamischen Werkstoffkennwerte herabsetzen. Die Ursachen sind bis auf den Wanddickenaspekt ähnlich denen der Kantenhärte/Weißeinstrahlung, wobei hier eine steigende Abkühlungsgeschwindigkeit zum Gussteilmittelpunkt angenommen wird.

[31, S. 302 ff.]

2.1.1.48 Ungleichmäßige Härte

Bei ungleichmäßiger Härte handelt es sich um ein Fehlerbild, welches nur von Gusseisen bekannt ist. Betroffen sind Wanddicken zwischen 10 mm und 15 mm und es treten Härteunterschiede von bis zu 60 HBW auf. In der chemischen Zusammensetzung sind keine Besonderheiten gegenüber den unbeeinträchtigten Gussteilen festzustellen. Im Gegensatz zu anderen härtebeeinflussenden Phänomenen wie Weißeinstrahlung oder Carbideinschlüssen zeigt der metallografische Schliff jedoch ein Perlitnetz auf. Die Besonderheit der ungleichmäßigen Härte ist das spontane Auftreten, ohne dass eine Veränderung der Gussparameter stattgefunden hat. Zu den möglichen Entstehungsursachen wird auf die Literatur verwiesen.

[31, S. 312 ff.]

2.1.1.49 Unvollständig ausgelauener Guss

Dieser Fehler resultiert aus unvollständiger Formfüllung. Am häufigsten betroffen sind die Bereiche, die am entferntesten vom Anschnitt liegen oder im oberen Teil der Form liegen. Sie weisen glatte, abgerundete und glänzende Oberflächen auf. Ursächlich sind zu niedrige Gießtemperaturen und zu lange Fließwege. Fließ- und Formfüllungsverhalten werden aber auch von der Legierungszusammensetzung beeinflusst.

[31, S. 321 ff.]

2.1.1.50 Vererzung

Es bilden sich hierbei festhaftende Konglomerate von Sand und Schmelze an heißen oder zu wenig verdichteten Formsandschichten. Im Unterschied zur Penetration kommt es hierbei zu einer chemischen Reaktion von Metall und Sandkorn (Versinterung, Verfrüftung). Die Ursachen und Entstehungsmechanismen sind bereits im zugehörigen Abschnitt 2.1.1.33 beschrieben. Die Herabsetzung der Oberflächenspannung durch Silikatschichten erhöht zudem die Eindringtiefe auch auf granularer Ebene und es entsteht eine festhaftende Schicht aus Metall, Sand und Schlacken. Die vorgefundenen Beispiele weisen in der Regel eine Dicke von ca. 0,5 mm - 1 mm auf.

[5, S. 114 ff.] [31, S. 324 ff.]

2.1.1.51 Versatz

Der Versatz wird unterschieden in Guss- und Kernversatz. Im Falle des Kerns können Versatz der Teilungsebene des Kerns oder auch eine Exzentrizität von der Sollposition selbst vorliegen. Es kommt also zur Lageabweichung zum Gussteil oder zu einer ungewollten Kernkontur. Im Falle des Formkastens ist nur eine Formabweichung möglich. Ursächlich sind fehlerhafte Ausrichtungselemente der Formkästen. [31, S. 328 f.]

2.1.1.52 Verzug

Verzug ist eine über eine festgesetzte Toleranz hinausgehende Gestaltabweichung durch Verformung und tritt mitunter erst bei der Nachbehandlung auf. Das ist der Grund, warum der mit bloßem Auge oft nicht zu erkennende Verzug oft erst nach allen Behandlungsschritten durch eine Maßkontrolle bewertet beziehungsweise festgestellt wird.

Es wird unterschieden zwischen Verzug infolge Auswerferkräfte (z.B. bei Druckgussteilen) bei ungenügendem Trennmittel und thermischen Verzug. Bei Erstgenanntem handelt es sich meist um ein Wechselspiel mit zu schwach ausgeprägten Ausformschrägen, Hinterschneidungen und Formbruch. Bei Letzterem sind zu hohe Prozesstemperaturen und zu kurze Zykluszeiten bei Druckgussteilen von maßgeblicher Bedeutung.

Grundsätzlich kann eine konstruktiv falsch ausgelegte, unregelmäßige und behinderte Schwindung Ausgangspunkt von Verzug sein. Kaltrisse bilden häufig Folgeerscheinungen.

[31, S. 331 f.]

2.1.1.53 Warmrisse

Warmrisse sind Materialtrennungen in gegossenen Werkstücken. Sie beginnen auf Kristallebene, können sich aber bis zur kompletten Zerteilung der Werkstücke aufspalten. Beim Abkühlen der Schmelze erfolgt durch die Schwindung des Werkstoffes eine Volumenkontraktion. Gerade bei langen, schmalen Formstücken oder großen Waddickenunterschieden kommt es zu hohen mechanischen Spannungen, die zum Reißen des Bauteils führen. Die Temperatur liegt hierbei noch über der Solidustemperatur, weshalb sich der Riss interkristallin ausbildet. [14, S. 466]

Aufgrund der hohen Temperatur ist häufig ein Oxidieren der Trennflächen zu beobachten [13, S. 34]. Das Auftreten der Risse scheint willkürlich zu sein und ist legierungsabhängig [14, S. 467]. Nach Erfahrungen von *Campbell* ist durch Verbesserung des Füllsystems eine fast vollständige Vermeidung von Warmrissen zu erreichen. Nach *Fritz* [28, S. 38] ist aber gerade bei Stahlguss eine warmrissfreie Primärerstarrung nur schwer zu erreichen.

2.1.1.54 Weißer Belag

Siehe Abschnitt 2.1.1.30 zu narbige Oberfläche.

[31, S. 343 ff.]

2.1.1.55 Werkzeugrückstände

Bei Recyclingvorgängen wie beispielsweise dem Einschmelzen von Bearbeitungsspänen in einem Vakuumlichtbogenofen können unerwünschte Begleiter in den Gussbarren gelangen und dort neue Fehlstellen bilden. Hierunter fallen Stahlgutreste oder Keramikformen, Bruchstücke von Hartmetallschneiden und Oxide aus dem Vormaterial. Auch werden die Barren mitunter nochmals abgeschliffen, um Verunreinigungen im Umschmelzprozess zu verringern, wobei es auch hierbei zu einem Oberflächeneintrag von Fremdpartikeln kommen kann [47, S. 11.1-27 und 28]

2.1.1.56 Winkelblasen

An heißen Sandkanten ist die Schmelze länger flüssig und die Erstarrung setzt später ein. Dadurch entwickelt sich im Fall gasarmer Schwindung ein Hohlraum mit dendritisch ausgeformter (siehe Abschnitt 2.1.1.27 zu Lunker) oder metallisch blanker Oberfläche, falls durch den vorherrschenden Gasdruck Gas aus dem Gussteilinnern angesammelt wird. Entscheidend hierfür sind die örtlichen Wärmeleiteigenschaften und die Gestaltgebung. Die vorgefundenen Beispielbilder lassen auf mehrere Millimeter große Gasblasen schließen.

[5, S. 120 ff.]

2.1.1.57 Ziehriefen

Auch Auswurfkratzer oder Ziehspuren genannt, tritt dieser Fehler nur bei Druckgussteilen auf. Diese Riefen verlaufen parallel zur Ausstoßrichtung beziehungsweise zur Ziehrichtung beweglicher Kerne und machen auf sich aufmerksam durch blanke, glänzende Kratzer auf der Oberfläche. Der Grad des Fehlers kann über eine Rauheitsmessung bestimmt werden. Erosion (Abschnitt 2.1.1.12) begünstigt das Auftreten von Ziehriefen. Zur Vermeidung bieten sich die Variation von Trennmitteldosierung, Trennmittelart, Zuhaltezeit, der Ausformschrägen und andere Maßnahmen an.

[31, S. 349 ff.]

2.1.2 Sintern

In den folgenden Abschnitten werden Fehler, die durch Sintern entstehen können, beschrieben. Nach DIN 8580 wird Sintern in die Gruppe 1.4 - Urformen aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand, eingeordnet [18].

2.1.2.1 Blährisse

Nach Beiss zeichnen sich Blährisse dadurch aus, dass die Oberfläche der Bauteile durch Risse aufgesprungen und aufgeworfen ist. Es entsteht eine fehlende Verbindung bzw. fehlender Zusammenhalt des Pulvers. Die Ursache für Blährisse ist entstehender Ruß, der die Verbindung des Sinterpulvers verhindert. Die Rußbildung kommt durch Gleitmittel und CO-Schutzgase zustande, aber auch zum Beispiel durch frisch aus der Fertigung stammende Sinterpulver. [7, S. 202–205]

2.1.2.2 Auf- und Abkohlung

Im Sinterprozess werden Gleitmittel benutzt, welche beim Erhitzen des Sinterpulvers vollständig verdampfen sollen. Gelingt dies nicht, kann es zu einer Auf- bzw. Entkohlung kommen. N_2 - H_2 -Schutzgas

mit Kohlenwasserstoffzusatz kann bei kohlenstoffarmen Stählen zu einer Aufkohlung bzw. bei kohlenstoffreichen Stählen zu einer Entkohlung an der Oberfläche führen. Sich verändernde Rostbeständigkeit, Oberflächenhärte und Biegebeständigkeit können sich als Störung entwickeln. [7, S. 206]

2.1.2.3 Wechselwirkung von Stickstoff mit Chromstählen

Wenn rostfreie Sinterstähle mit hohem Chromgehalt unter Schutzgas gesintert werden, kann es passieren, dass das Stickstoff des N_2-H_2 -Schutzgases in den Stahl eindiffundiert. Es bildet sich ein Gefüge aus Stahl und Chromnitridlamellen, welches nicht mehr rostfrei ist, jedoch eine höhere Härte aufweist. [7, S. 206–209]

2.1.2.4 Anschmelzen mit Kohlenstoff beim Hochtemperaturesintern

Wird bei einer Temperatur über 1150°C gesintert, besteht die Möglichkeit, dass die Werkstückoberfläche bei Kontakt mit Kohlenstoff aus dem Sinterträger oder aus dem abstützendem Granulat mit diesem anschmilzt. Es resultiert eine ungleichmäßige Chromverteilung im Gefüge und Einfallstellen in der Oberfläche können entstehen. [7, S. 209–210]

Öl auf der Matrizenplatte durch Verunreinigungen bindet über Zeit weitere feine Partikel. Es bildet sich ein dunkler Schlamm, der bei Kontakt mit dem Bauteil zu Anschmelzungen und Löcher führen kann. [7, S. 214–216]

2.1.2.5 Delamination

Delamination entsteht bei hohen Pressdichten und zeichnet sich durch feine Trennungen zwischen dem Pulver senkrecht zur Pressdichtung aus. Beim Ausstoßen des Bauteils kommt es zu einer Aufweitung senkrecht zur Pressrichtung durch Rückfederung. Es verändern sich die Schwingfestigkeit und Risszähigkeit, die Bauteilhärte bleibt dagegen gleich. [7, S. 210–214]

2.1.2.6 Rost im Pulver

Durch Sinterpulver mit Oberflächenrost können Rostpartikel in das Bauteil gelangen. Nach dem Sintern entstehen an den Stellen mit Rostpartikeln Eisenschwämme mit erhöhter Porosität. [7, S. 216]

2.1.2.7 Sulfidbildung

Zur Sulfidbildung kommt es, wenn Sinterteile in Verbindung mit Schwefel kommen. Schwefel kann als Zusatz in Ölen und Fetten auftreten. Entstehendes Kupfersulfid und Eisensulfid haben eine geringere

Schmelztemperatur und es kann somit zur Bildung einer flüssigen Phase führen. Dadurch verliert das Bauteil an Volumen und es kann zu lokalen Schrumpfungen kommen. [7, S. 216–217]

2.2 Umformen

Umformen kann in Warm- und Kaltumformung unterteilt werden. Die folgenden Kapitel beschreiben die typischen, dabei auftretenden Fehler.

2.2.1 Warmumformen

Warmumformungen finden stets oberhalb der Rekristallisationstemperatur des Werkstoffes statt. Durch die erhöhten Temperaturen steigt das Formänderungsvermögen der Bauteile. Dadurch können größere Umformgrade als beim Kaltumformen erzielt werden. Die relevantesten Warmumformverfahren sind Schmieden, Walzen und Pressen. [42, S. 97]

Eine der häufigsten Fehlerursachen sind fehlerbehaftete Umformrohlinge. Diese können jegliche Fehler aus den vorangegangenen Herstellprozessen enthalten. Die, in den zugekauften Gussrohlingen auftretenden makro- und mikroskopische Fehlstellen, sind im Abschnitt 2.1 Urformen beschrieben.

Sind bereits Fehlstellen wie Lunker, Poren oder Gasblasen im Bauteil vorhanden, werden diese meist durch die Druckumformung geschlossen und durch die Wärme im Bauteil verschweißt. Sind diese vorhandenen Fehlstellen bereits durch Sauerstoff oxidiert, kann der Umformprozess diese Fehlstellen zwar räumlich schließen, aber das Gefüge nicht mehr homogen verschweißen. Es kommt somit zu inneren sehr dünnen Fehlstellen, an denen kein kristalliner Gefügezusammenhalt besteht. [11, S. 158] [33, S. 357] [47, S. 11.1–32]

Ist der Umformgrad der Bearbeitung zu gering oder die Temperatur im Werkstück zu niedrig, können vorherige Fehlstellen aus dem Urformprozess nicht vollständig beseitigt werden. Es bleiben nach dem Umformen also weiterhin Lunker, Poren und Gasblasen im Bauteil vorhanden. [47, S. 11.1–16]

Oxidierte Oberflächenlunker können zu Faltungen und Dopplungen führen. Bei Faltungen kommt es zu einem Einschluss. Durch das Auffalten einer nicht verschweißten Gefügeschicht wird meist Luft eingeschlossen. Die Dopplung beschreibt das Übereinanderschieben von Gefügeschichten, welche voneinander getrennt sind. Diese Effekte führen zu flächenhaften Fehlstellen im Bereich unter der Oberfläche der Bauteile. [47, S. 11.1–27] [11, S. 254] [4, S. 317]

Trotz des erhöhten Formänderungsvermögens bei der Warmumformung sind Oberflächenrisse eines der häufigsten Schadensbilder. Diese entstehen, wenn durch zu starke Umformung lokal das Formänderungsvermögen des Bauteils überschritten wird, also zu große lokale Spannungen vorliegen. Beim Stauchen oder Freiformschmieden können Längs- und Querrisse an der Oberfläche entstehen. [53, S. 29]

Beim Fließpressen sind Schubrisse im 45°-Winkel zur Längsrichtung ein typisches Fehlerbild. Oberflächenrisse können ebenso durch den Einsatz von zu viel Schmiermittel oder blockierte Schmiermittelabflüsse entstehen. Hierbei kann der Schmierstoff nicht sauber aus der Form entweichen und explodiert unter dem hohen Druck des Umformvorgangs. [53, S. 45]

Durch die tangentialen Druckbeanspruchungen an der Oberfläche der Bauteile während des Prozesses kommt es zu einer Anisotropie im Gefügebau. Die Gefügefaser werden entsprechend der Bean-

spruchung im Gefüge ausgerichtet. Es bildet sich ein gerichtetes Gefüge, welches in unterschiedliche Richtungen verschiedene Charakteristiken aufweist. Es werden nicht nur die Kornstruktur ausgerichtet, sondern auch Seigerungen, Schlackefäden und nichtmetallische Einschlüsse. [47, S. 11.1–16] [4, S. 316]

Beim Warmumformen kann es außerdem zur Bildung einer Zunderschicht auf der Oberfläche der Rohlinge oder Bauteile kommen. Beim Abtragen der Zunderschicht können Bruchstücke der Schleifscheiben oder Partikel aus dem Strahlreinigen auf die Oberfläche der Teile gelangen. Diese werden dann bei einem weiteren Umformvorgang in die Oberfläche des Bauteils eingedrückt. [47, S. 11.1–27]

Da beim Umformen unter Temperatureinfluss nicht nur eine Umformoperation sondern gleichzeitig immer das Bauteil mit unterschiedlichen Temperaturniveaus in Kontakt kommt, kann es zu Fehlern auf metallurgischer Ebene kommen, wenn das Primär- in das Sekundärgefüge umgewandelt wird. [42, S. 97] Dies passiert dann, wenn Temperaturen nicht genau eingehalten werden, Haltezeiten falsch ausgelegt sind oder die Abkühlvorgänge fehlerhaft gestaltet sind. Ist die Aufwärmzeit zu kurz oder wärmt sich das Bauteil nicht homogen genug auf, kann es zu Spannungsrissen kommen. Ist die Temperatur zu niedrig werden Eigenspannungen im Material induziert und somit eine Kaltverfestigung ausgelöst. Ebenso können Fehlstellen nicht ordentlich verschweißt werden. Ist die Temperatur zu hoch oder die Haltezeit zu lang, kommt es zu einer Vergröberung des Gefüges. Auch können hier die Effekte der Randentkohlung und Zunderbildung auftreten. Dies hat jeweils eine Festigkeitsminderung zur Folge. Wird die Abkühlzeit zu kurz gewählt, kommt es zur Bildung von zu großen Eigenspannungen, aus denen wiederum Risse entstehen können. Das Werkstück hat eine höhere Festigkeit, die ebenso nicht den Spezifikationen entsprechen kann. Kühlt das Werkstück zu langsam ab, kommt es ebenso zur Zunderbildung. [11, S. 254]

2.2.2 Kaltumformen

Bei der Kaltumformung, unterhalb der Rekristallisationstemperatur, ist der Werkstoff weniger fließfähig, da keine Gefügeneubildung während des Werkstoffflusses stattfinden kann. Aufgrund der nicht vorhandenen Gefügeneubildung, erhöhen sich die Eigenspannungen des Bauteils abhängig vom Umformgrad. Diese induzierten Eigenspannungen sind Ursache für unterschiedliche Werkstückfehler. [47, S. 11.1–32] Diese sogenannten Kaltrisse treten meist an Stellen mit großer Umformung auf. [11, S. 253] [53, S. 99] [4, S. 317]

Die induzierten Eigenspannungen müssen nicht direkt zu einem Kaltriss führen, solange das lokale Formänderungsvermögen des Bauteils nicht überschritten wird. Allerdings können die Eigenspannungen in nachfolgenden Bearbeitungsschritten oder während der Benutzung zu sogenannten Korrosionsrissen führen. Dies kann durch ein nachträgliches Spannungsarmglühen des Bauteils verhindert werden. Parallel geht allerdings der Effekt der Kaltverfestigung durch das Glühen verloren. [42, S. 96 f.]

Die Risse können sowohl im Gefüge, als auch an der Oberfläche der Bauteile auftreten. Die möglichen Rissabmessungen werden in der Literatur nicht exakt beschrieben, sie sind sehr stark vom Spannungszustand und der Größe des gesamten Bauteils abhängig. Von Haarrissen bis hin zu langen Rissen über Bauteiloberflächen, mit bis zu mehreren Millimetern Breite bei aufklaffenden Rissen. [4, S. 315 f.]

Ein weiterer Fehler hat die Ursache in einer zu geringen Umformung des Werkstoffes. Die zu geringe Umformung bewirkt, dass Fehlstellen aus dem Vorprozess wie Lunker und Poren nicht verschlossen werden und weiterhin im Bauteil verbleiben. [47, S. 11.1–32]

2.3 Fügen

Nach DIN 8580 wird Schweißen in die Gruppe 4.4 - Fügen durch Schweißen, eingeordnet [18] und soll als wichtigstes stoffschlüssiges Fügeverfahren hier betrachtet werden [28, S. 125].

Eine Übersicht der geläufigsten Schweißfehler ist in DIN EN ISO 6520 zu finden [23]. Im Folgenden wird zwischen fertigungsbedingten und werkstoffbedingten Schweißnahtfehlern unterschieden. [49, S. 269] [16, S. 259]

2.3.1 Fertigungsbedingte Schweißnahtfehler

Nach Dilthey unterscheidet man zwischen inneren und äußeren fertigungsbedingten Schweißnahtfehlern, die aus unsachgemäßer Fertigung resultieren [16, S. 259]. Zuerst sollen äußere Schweißnahtfehler aufgeführt werden.

Schweißspritzer entstehen durch Metalltröpfchen, die sich aus der Schmelze lösen und sich dann verteilen. Eine Nacharbeit der Oberfläche kann nötig werden. Zündstellen entstehen durch den Kontakt der Elektrode mit dem Werkstück. Diese verursachen lokale Aufhärtungen, welche wiederum zu Härterisse führen können. [16, S. 259–260]

Einbrandkerben und Randkerben sind Vertiefungen zwischen Schweißgut und Werkstoff. Diese rinnenförmigen Vertiefungen können mit Schlacke gefüllt sein. Sie bewirken eine Querschnittsminderung und Kerbwirkung, welche wiederum zu Rissen und Versagen des Bauteils führen können. Solche Kerben entstehen meist durch überhöhte Schweißgeschwindigkeit oder falsche Schweißwinkel. Ebenfalls können Wurzeldurchhang, Wurzelrückfall, nicht durchgeschweißte Wurzeln etc. Querschnittsminderungen und Kerbwirkungen erzeugen. [16, S. 260–261]

In DIN EN ISO 5817 werden für diese Fehler Grenzwerte in Abhängigkeit von Nahtbreite und Blechdicke für drei Bewertungsgruppen angegeben. [22]

Innere Nahtfehler sind nach Dilthey nur durch Prüfverfahren wie Ultraschall, Röntgenprüfung, etc. feststellbar. [16, S. 262]

Bindefehler sind innere Nahtfehler, bei dem Grundwerkstoff und Schweißgut bzw. Schweißgut und Schweißgut sich nicht verbunden haben. Diese Kaltstellen sind neben Rissen die gefährlichsten Nahtdefekte. Sie entstehen durch falsche Prozessparameter oder durch das Überschweißen von Schlacke oder Schmelzbad. [16, S. 262–263]

Schlacken und Feststoffeinschlüsse entstehen durch metallurgische Reaktionen des Schmelzbades beim Schutzgasschweißen oder durch die Umhüllung beim Schweißen mit Stabelektroden durch die Elektrodenumhüllung. Die sich bildende Schlacke bzw. Feststoffe werden überschweißt und gelangen so als Einschluss in die Naht. [16, S. 263–264]

So bilden sich meist rundliche, nichtmetallische Einschlüsse [49, S. 279].

Auf Grund der verschiedenen Elektrodenmaterialien und den sehr unterschiedlichen Zugfestigkeiten von zum Beispiel Kupfer oder Wolfram, ist von einer sehr individuellen positiven oder negativen Festigkeitsänderung auszugehen [29] [30]. Mechanische Poren entstehen durch eingeschlossene expandierende Gase durch Schweißwärme. Solche Gase entstehen durch das Überschweißen von Verunreinigungen wie

Kondenswasser, Fette etc.. [16, S. 264–265]

2.3.2 Werkstoffbedingte Schweißnahtfehler

Nach Dilthey entstehen werkstoffbedingte Nahtfehler durch die Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe, Schweißwärme und Spannungen, sowie Verunreinigungen und unsachgemäße Fertigung. [16, S. 266] Heißrisse und Kaltrisse treten auch beim Schweißen auf. [49, S. 276]

Für die Theorie hinter diesen Fehlerarten wird auf das Kapitel zu den Gießfehlern verwiesen. Schulze nennt als gefährlichste Schadensform den wasserstoffinduzierten Kaltriss, da dieser erst im Verlauf einiger Tage nach dem Schweißen entsteht. Wasserstoff aus dem Werkstoff diffundiert und bildet nach und nach Mikrorisse. [49, S. 277–281]

Hohlräume wie metallurgische Kugelporen und Schlauchporen bilden sich durch eingeschlossene Gase, hauptsächlich Wasserstoff, Stickstoff und Kohlenmonoxid, im Schweißgut. [16, S. 287–288]

Weitere Hohlraumfehler sind Lunker. Lunker bilden sich durch zu geringes Nachfließen der Schmelze bei einhergehender Schwindung beim Erstarren der Schmelze [16, S. 289].

2.4 Stoffeigenschaften ändern

Im Bereich Stoffeigenschaften ändern werden in den folgenden Unterabschnitten der Wärmebehandlung Härten, Vergüten, Glühen und Thermochemische Diffusion in Hinblick auf Fehler im Werkstückrohling betrachtet.

2.4.1 Wärmebehandlung

Dieser Abschnitt beschreibt die bei der Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen auftretenden Fehlerpotentiale. Im Zusammenhang mit dieser Arbeit liegt der Fokus nicht auf den detaillierten metallurgischen Prozessen. Es werden die Erscheinungsbilder betrachtet, in welcher Form die verursachten Prozessfehler im Werkstück später detektierbar sind.

Zusätzlich kann noch zwischen einer globalen Gefügeveränderung im gesamten Bauteil und einer lokalen Gefügeänderung in den Randzonen unterschieden werden. [27] Nicht nur die Gefügezusammensetzung sondern auch Korngröße, Kornverteilung, Korngrenzenverlauf und Kornorientierung können maßgeblich die Qualitätseigenschaften des Rohteils und des Werkstückes beeinflussen. [47, S. 11.1–2]

Quer zur Faser orientierte Korngrenzen führen zu einer geringeren Festigkeit und einer geringeren Duktilität als Korngrenzen, welche in Längsrichtung der Faser beansprucht werden. Daraus folgt eine höhere Gefahr zur Rissbildung und anschließendem schnelleren Rissfortschrittverhalten. [47, S. 11.1–8]

2.4.1.1 Härten

Das Ziel des Härtens ist es, ein vollständiges martensitisches Gefüge herzustellen. Dadurch wird die statische und dynamische Festigkeit des Bauteils erhöht. Die Zähigkeitswerte werden allerdings herab-

gesetzt. Hierbei gibt es verschiedene Fehlerquellen, die zu beachten sind. Die Härtetemperatur kann falsch gewählt oder nicht eingehalten werden, die Haltedauer hat die falsche Zeitspanne oder es treten Temperaturschwankungen während des Haltens auf. Desweiteren spielt das Abschrecken des Bauteils für die Martensitbildung eine entscheidende Rolle. Dabei sind das falsche Abschreckmedium oder die falsche Temperaturkurve typische Fehlerquellen. Ebenso spielen ungleichmäßige Gefügebauten des zu härtenden Rohlings eine Rolle bei der gleichmäßigen Härtung des Bauteils. Ist beispielsweise der Kohlenstoff durch den Urformprozess des Halbzeugs nicht gleichmäßig im Gefüge verteilt, kann dies dazu führen, dass das gehärtete Bauteil lokale Festigkeitsunterschiede aufweist. [46, S. 165]

Ist die Härtetemperatur zu hoch, bildet sich grobkörniges Gefüge, der Werkstoff wird besser zerspanbar und weicher. Reicht die Härtetemperatur nicht aus oder wird der Werkstoff zu langsam abgeschreckt. Der Werkstoff weist entweder global eine geringere Festigkeit auf oder hat ein inhomogenes Festigkeitsgefüge. [46, 178f] [43, 336, 346f]

Bei einer zu großen Temperaturdifferenz oder bei ungleichmäßigem Abkühlen kann es zu Härteverzug und Rissbildung kommen.[33, S. 410] [42, S. 235] [43, S. 340–344] [46, S. 179]

2.4.1.2 Vergüten

Beim Vergüten wird die höhere Festigkeit des Härtens mit genügend Duktilität durch das Anlassen in den Werkstoffen kombiniert. [42, S. 132]

Beim Anlassen von Stählen können diese verspröden. Grund hierfür sind Verunreinigungen, welche sich an den Korngrenzen ansammeln. Die Folge ist eine Abnahme der Zähigkeit des Werkstoffs, das Gegenteil des gewünschten Effekts. Des Weiteren führen das Nichteinhalten oder falsch definierte Prozessparameter, wie Temperaturverlauf, Zeit und Atmosphäre zu Abweichungen in Festigkeit und Dehnungseigenschaften der Bauteile. [42, 248f]

2.4.1.3 Glühen

Glühen beinhaltet eine breite Auswahl an verschiedenen Verfahren. Alle Verfahren verringern gezielt die Härte und Festigkeit des Werkstoffes. Die Verbesserung der Zähigkeit und Umformbarkeit, die Bildung eines homogenen Gefüges, der Abbau von Eigenspannungen und Effusion sind andere Effekte, die durch diese Form der Wärmebehandlung hervorgerufen werden. [46, S. 162–164]

Auch beim Glühen kann es prozessbedingt zu unterschiedlichen Fehlern kommen, welche sich alle auf die Härte, Festigkeit und die Gefügestruktur auswirken. Zu hohe Temperaturen und eine zu lange Haltezeit wirken sich in einem zu weichen Gefüge in Härte und Festigkeit aus. Eine zu geringe Temperatur kann zu ungleichmäßiger Carbidverteilung im Bauteil führen, was sich in einem erhöhten Werkzeugverschleiß bei der spanenden Bearbeitung zeigt. [43, S. 334–336]

2.4.1.4 Thermochemische Diffusion

Thermochemische Diffusion ist die Wärmebehandlung von Werkstoffen und Bauteilen in einer definierten Atmosphäre. Dies führt zu einer Veränderung der Härte und Festigkeit in den Randzonen. Fehlerursachen

in diesen Prozessen sind die Prozessparameter Temperatur, Zeit und chemische Umgebung. Wird einer der Parameter falsch ausgelegt oder nicht eingehalten, so kommt es im späteren Bauteil zu abweichenden Härte- und Festigkeitseigenschaften. Diese können sowohl weicher als auch Härter ausfallen. [43, S. 339, 357] [11, S. 269]

Die Änderung der Festigkeits- und Duktilitätseigenschaften nach fehlerhaften Wärmebehandlungsvorgängen abzuschätzen, ist nicht so einfach möglich. Die Werte schwanken in einem breiten Bereich. Es gibt viele unterschiedliche Faktoren zu bedenken, deren Einfluss nicht genau definiert werden kann. Der Werkstoff, reale Legierungszusammensetzung, Temperaturabweichungen, Temperaturverlaufsabweichungen, Umgebungsmedium und die Bauteilgeometrie sind nur die Haupteinflussfaktoren auf den durchgeführten Wärmebehandlungsprozess.

Detektierbar werden die Fehler über die veränderten Festigkeits- und Duktilitätswerte des Werkstoffes oder des Bauteils. Hierbei ist festzuhalten, dass viele unterschiedliche Fehlerquellen sich in den gleichen Symptomen bemerkbar machen.

2.5 Trennen

Im Bereich Trennen nach DIN 8580 [18] findet sich im Unterpunkt 3.2 „Spanen mit geometrisch definierter Schneide“. Diese sind nach [28, S. 3] beispielsweise Drehen, Bohren oder Fräsen.

Die Fehler lassen sich nach Klocke wiederum in drei Kategorien einteilen. Diese sind Gestaltabweichungen, Formabweichungen und Lageabweichungen. [37, S. 11]

Gestaltabweichungen werden nach DIN 4760 [20] in sechs Ordnungen unterteilt. Unter der ersten Ordnung werden Unebenheiten verstanden. Dies sind unter anderem Geradheits-, Ebenheits- und Rundheitsabweichungen und betreffen die gesamte Oberfläche des Formelements. Welligkeiten, auch Gestaltabweichungen 2. Ordnung treten überwiegend periodisch auf und entstehen durch periodisch (fremderregte) Schwingungen. Systematische Abweichungen, welche aus der Durchdringung von Werkzeug und Werkstück hervorgehen versteht man als Abweichungen dritter Ordnung. Rillen sind zufällige Gestaltabweichungen (4. Ordnung), welche durch Spanbildungsvorgänge entstehen. Gestaltabweichungen 5. und 6. Ordnung sind in der Größenordnung der Gefüge- und Gitterstruktur und können mit „zur Zeit gebräuchlichen Oberflächenmessverfahren nicht erfasst werden“ [20, S. 1].

Als Formabweichungen definiert man die „Abweichungen von einer vorgeschriebenen, idealen geometrischen Eigenschaft wie Geradheit, Ebenheit, Rundheit oder Zylinderform“ [37, S. 12]. Diese werden in [19] näher beschrieben.

Unter Lageabweichungen werden Abweichungen geometrischer Elemente wie Achsen, Kanten oder umlaufenden Linien von ihrer Sollposition verstanden. [37, S. 13]

Durch Kerbenverschleiß der Hauptschneide des Werkzeuges kann weiterhin ein Grat an Werkstückkanten entstehen. [37, S. 12 f.]

3 Auswahl und Klassifizierung der Fehler

Die in der einschlägigen Fachliteratur aufgeführten Fehler sind in den Tabellen 3.1 bis 3.4 dargestellt. Die Fehler werden benannt und mit ihren jeweiligen geometrischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften beschrieben. Das dazugehörige Fertigungsverfahren ist ebenfalls aufgeführt. Da sich viele Fehler in ihren nach außen hin ersichtlichen Fehlerbildern und Erscheinungsformen gleichen, werden diese nach typischen Eigenschaften in verschiedene Überkategorien eingeteilt.

Im Folgenden werden die einzelnen gewählten Kategorien: Hohlraum, Einschluss, Materialtrennung und Festigkeits-/Härteänderung für diese Arbeit nach einem allgemeinen Verständnis definiert. Ebenso werden aus den einzelnen Kategorien charakteristische Eigenschaften abgeleitet und abstrahiert.

In der Kategorie Einschlüsse, sind alle Fehler zusammengefasst, welche Fremdmaterial im Gefüge des Werkstoffes einschließen (siehe Tabelle 3.1).

Nach Analyse der unterschiedlichen Einschlusseigenschaften können Einschlüsse für die Nachbildung wie folgt beschrieben werden. Einschlüsse sind komplett umschlossene Fremdkörper im Gefüge, welche sich in den chemisch/physikalischen und mechanischen Eigenschaften vom globalen Gefüge unterscheiden. Einschlüsse können sich also in Festigkeit, Härte und in den chemischen Bestandteilen vom Grundmaterial unterscheiden. Die geometrischen Abmaße der Einschlüsse, sind je nach Bauteilgröße und Material, im Bereich 0,1 mm bis mehrere Millimeter anzusiedeln.

Die Kategorie Materialtrennungen (siehe Tabelle 5.3) beinhaltet in ihrer geometrischen Erscheinung ebene Phänomene. Es gibt keine metallurgische Gefügeverbindung zwischen den sich gegenüberliegenden Flächen.

Materialtrennungen sind metallisch nicht verbundene Ebenen. Sie treten in flächiger Form auf. Der Abstand der Ebenen kann von technisch keinem Abstand, also direktes Anliegen der Flächen, bis zu aufklaffenden Rissen im Millimeter-Bereich betragen. Materialtrennungen können sowohl im Bauteil, als auch an der Bauteiloberfläche auftreten. Bei weit aufklaffenden Rissen weist die Materialtrennung ähnliche Eigenschaften wie Hohlräume auf. Deswegen konzentriert sich diese Arbeit bei der Nachbildung der Materialtrennungen auf geometrisch kleinere Materialabstände, welche nicht von den Hohlräumen abgedeckt sind, sich also im μm -Bereich befinden.

Einschlüsse		
Fertigungs- verfahren	Fehlerbild	Eigenschaften
Urformen	Dross/Krätzeinschluss	Durchmesser um 1mm; enthält 50 - 80 % Metall
Urformen	Fließlinien	unter anderes Fehlerbild eingeordnet: Rauher Guss
Urformen	Fließmitteleinschluss	zumeist in Bifilms anzutreffen. Bilden Lokalelemente, wenn offen gegenüber Umgebung.
Urformen	Flocken	Wasserstoffansammlung, die im Erstarrungsverlauf Spannungsrisse erzeugt. Größe von Spannungsrisen. Länge ca. 40 µm, Breite < 1 µm
Urformen	Glanzkohlenstoffeinschlüsse	Glanzkohlenstoffschicht, die mitunter eingeschlossen ist.
Urformen	Impfmitteleinschluss	0,5 mm-Feld; Mikrohärtigkeit HM 25 195 - 600
Urformen	Metallischer Einschluss	keine Angaben
Urformen	Oxideinschlüsse	als Einschlüsse 0,1 - 0,5 mm, meist 0,2 mm
Urformen	Phosphideutektikum	Durchmesser: 0,04 mm; Auswirkung: keine quantitativen Angaben
Urformen	Sand mit/ohne Guss auf Gussoberfläche (Angebrannter Sand) (Rauher Guss) (Penetration) (Vererzung)	Formsand, oft in Guss eingeschlossen, haftet auf Gussoberfläche, Härte Quarz 7 Mohs - ca. 1120 HV
Urformen	Sandeinschlüsse (Formerosion) (Ballenbarisse)	ca. 6 mm; 0,2-0,4 mm (nur das Korn) nach Campbell, Härte Quarz 7 Mohs - ca. 1120 HV
Urformen	Schlackeeinschlüsse (Schaumstellen)	Einschluss von Schlacke - an Korngrenzen und Oberfläche; oft auch Hohlraum, da Schlacke herausgelöst.
Urformen	Schülpfen und Treibstellen	durch fehlenden Formsand vergrößertes Gussteil, deutlich sichtbar
Urformen	Schwitzperlen	bis zu 20 mm Durchmesser (Metalltropfen auf Oberfläche)
Urformen	Seigerung - Makroseigerung	1 cm - 1 m Länge
Urformen	Seigerung - Mikroseigerung	10 µm - 100 µm Länge
Urformen	Seigerung (Dirty White Spots) diskret und dendritisch, verunreinigt	Härteänderung unbekannt, LCF-Festigkeit und Duktilität stark herabgesetzt.
Urformen	Seigerung (Discrete White spots)	mehrere mm Durchmesser; bis 30 % Härteabfall, ca 20 % geringere Festigkeit
Urformen	Seigerung (White spots) dendritisch, erstarrung	dendritengroße bis flächige oder deutlich größere Strukturen: Durchmesser: 1cm bis 1 m , Härteabfall ohne genaue Angabe
Urformen	Spritzperlen	keine Angaben
Urformen	Versatz	keine Angaben
Urformen	Werkzeugrückstand: Keramik-/Schneidmitteleinschluss	deutlich härter als Restgefüge: über 2000 MPa
Umformen	Nichtmetallische Verunreinigungen	Teile von Schneiden oder Strahlpartikeln: Deutlich härter als Restgefüge: über 2000 MPa
Schweißen	Schlacken und andere Feststoffeinschlüsse	abhängig von Naht, bis zu 4mm Höhe und 75mm Länge, sehr individuell, Kupfer bis Wolfram (350 bis 4200 N/mm²)

Tabelle 3.1 – Zusammenfassung der Fehler vom Typ Einschlüsse

Materialtrennung		
Fertigungs- verfahren	Fehlerbild	Eigenschaften
Urformen	Blattrippen	mm bis cm-Bereich
Urformen	Kaltlauf <i>cold shuts</i>	flächig, Länge und Breite von Mikrometer bis cm-Bereich
Urformen	Kaltrisse	µm Breite bis komplette Zerteilung
Urformen	Oxidhautlagen <i>bifilm</i>	abhängig von Größenverhältnissen und Speisung
Urformen	Schichtporosität	0,05 bis mehrere mm Länge
Urfomen	Warmrisse	µm bis mm / komplette Zerteilung
Umformen	Dopplung/Trennung	Breite in µm, mehrere mm Länge, nicht metallurgisch verbunden
Umformen	Kaltrisse	0,05 bis mehrere mm Länge
Umformen	Oberflächenrisse	0,05 bis mehrere mm Länge
Umformen	Schubrisse	0,05 bis mehrere mm Länge
Umformen	Warmrisse	0,05 bis mehrere mm Länge
Sintern	Delamination	Breite im Bereich 20 µm, Länge mehrere mm
Schweißen	Bindefehler und ungeschweißte Stellen	keine Angabe
Wärme- behandlung	Härterisse	µm- bis mm-Bereich
Wärme- behandlung, Urformen	Verzug	bis zu mehreren mm der Außengeometrie

Tabelle 3.2 – Zusammenfassung der Fehler vom Typ Materialtrennung

Hohlraum		
Fertigungs- verfahren	Fehlerbild	Eigenschaften
Urformen	Anschmelzen durch Kohlenstoff	Tiefe: 0,5 - 1,2 mm
Urformen	Gasblasen - Gas aus Wandreaktion (Gasporosität)	Durchmesser: 0,05 - 0,5 mm
Urformen	Gasblasen - Gasmitnahme durch Speiser bei turbulenter Speisung (Winkelblasen)	Durchmesser: 1 - 5 mm
Urformen	Gasblasen - gelöstes Gas (Gasporosität)	Durchmesser: 0,05 - 0,5 mm
Urformen	Gasblasen - Kernblasen (Winkelblasen)	Durchmesser: 5 - 500 mm
Urformen	Gießgrat (Formschalenrisse) (Brandrisse)	von der Schmelze ausgefüllte Freiräume in der Form.
Urformen	Kommafehler	Breite: mehrere mm, Länge: bis 20 mm
Urformen	Makrolunker	Durchmesser: 10 - 2000 mm
Urformen	Mikrolunker (Mikroporosität)	Durchmesser: 0,1 - 1 mm
Urformen	Narbige Oberfläche (Weißer Belag)	bis zu ca. 1 mm tief
Urformen	Oberflächenblasen	Breite: 5 mm, Länge: 15 mm
Urformen	Pinhole - Nadelstichporosität	Tiefe: ca. 0,1 - 5 mm
Urformen	Unvollständig ausgelaufener Guss	mm-Bereich bis cm-Bereich
Urformen	Versatz	keine Angaben
Sintern	Blährriss	Außenmaße: 0,1 - mehrere mm
Sintern	Delamination	Durchmesser: 20 bis 100 µm
Sintern	Sulfidbildung	Breite: 20 µm, Länge: 100 µm
Sintern	Ziehriefen	im Bereich der Rauigkeit
Schweißen	Einbrand/Randkerben	Tiefe/Breite: 1 mm
Schweißen	Lunker	Durchmesser: 2 mm
Schweißen	mechanische Pore	Durchmesser: 5 mm
Schweißen	metallurgische Pore	abhängig von Naht, bis zu 4 mm Höhe und 75 mm Länge

Tabelle 3.3 – Zusammenfassung der Fehler vom Typ Hohlraum

Die dritte Kategorie sind Hohlräume (siehe Tabelle 3.3). Hier sind alle geometrischen Formen eingeschlossen, welche ähnliche geometrische Abmaße in allen drei Raumrichtungen aufweisen. Die abgeschlossenen Räume sind nicht durch festes Material im Gefüge verfüllt. Die Füllung kann Luft, ein anderes Gas oder ein Vakuum sein.

Abstrahiert können Hohlräume für die spätere Umsetzung in einer Probe als abgeschlossene dreidimensionale Geometrien im Bauteilgefüge angesehen werden. Hohlräume können im Werkstoff einzeln oder in Nestern auftreten. Die äußeren Abmaße sind stark bauteilabhängig und befinden sich im Bereich von Mikrometern bis mehreren Zentimetern.

Festigkeitsänderung		
Fertigungsverfahren	Fehlerbild	Eigenschaften
Urformen	Carbide	in anderen Fehlerbildern enthalten (siehe auch Grundlagen)
Urformen	Chunky-Graphit	keine Angabe
Urformen	Graphitentartung	GJL statt GJS, Länge: 0,1 - 2 mm
Urformen	Graphitflotation	keine Angabe
Urformen	Harte Stellen	in anderen Fehlerbildern enthalten (siehe auch Grundlagen)
Urformen	Kantenhärte/Weißeinstrahlung	hohe Härte gegenüber Restgefüge, mehrere mm über Querschnitt
Urformen	Kernbruch	Sand-/Gusseinschluss durch Formstoff unbekannten Ausmaßes
Urformen	Metallischer Einschluss	Mikrohärte 800 bis 1000
Urformen	Plattenbruch	Gefügeveränderung unbekannten Ausmaßes
Urformen	Seigerung (Discrete White spots)	mehrere mm, bis 30 % Härteabfall, ca. 20 % geringere Festigkeit
Urformen	Umgekehrte Weißeinstrahlung, <i>Inverse Chill</i>	Unbekannte Härtesteigerung
Urformen	Ungleichmäßige Härte	Querschnittunterschiede in der Härte von 60 HBW (30% im Beispiel)
Sintern	Auf-/Abkühlung	+/- 5-10% Festigkeit
Umformen	Ausrichten des Gefüges	Anisotropie des Werkstoffes
Umformen	Eigenspannungen/Kaltverfestigung	kann Streckgrenze des Werkstoffes überschreiten, Kaltriss möglich
Wärmebehandlung	Flasche Gefügezusammensetzung	1250 N/mm ² -720 N/mm ²
Wärmebehandlung	Kornvergrößerung	1250 N/mm ² -720 N/mm ²
Wärmebehandlung	Randaufkühlung	1250 N/mm ² -720 N/mm ²
Wärmebehandlung	Randentkühlung	1250 N/mm ² -720 N/mm ²
Wärmebehandlung	Weichfleckigkeit	1250 N/mm ² -720 N/mm ²

Tabelle 3.4 – Zusammenfassung der Fehler vom Typ Festigkeitsänderung

Die vierte Kategorie sind die Festigkeits- und Härteunterschiede (siehe Tabelle 3.4). In diese Kategorie entfallen alle Effekte, welche eine Gefügeveränderung auf metallurgischer Ebene hervorrufen.

Die Festigkeitsänderung ist eine Änderung der mechanischen Eigenschaften des lokalen und globalen Gefüges. Die Gefügeveränderungen sind aus demselben Material und ohne Materialtrennung metallisch verbunden. Die Festigkeits- und Härteunterschiede können je nach Werkstoff und Bauteilgeometrie in einem großen Bereich schwanken.

4 Nachbildung der Fehler

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Nachbildung der Fehler in Proben. Um diese Fehler bestmöglich nachstellen zu können, wurden verschiedene Konzepte erarbeitet, diskutiert und im Punktwertverfahren bewertet. Im folgenden werden für die Fehler die finalen Nachbildungen durch Proben vorgestellt.

4.1 Beschreibung des Probenkörpers

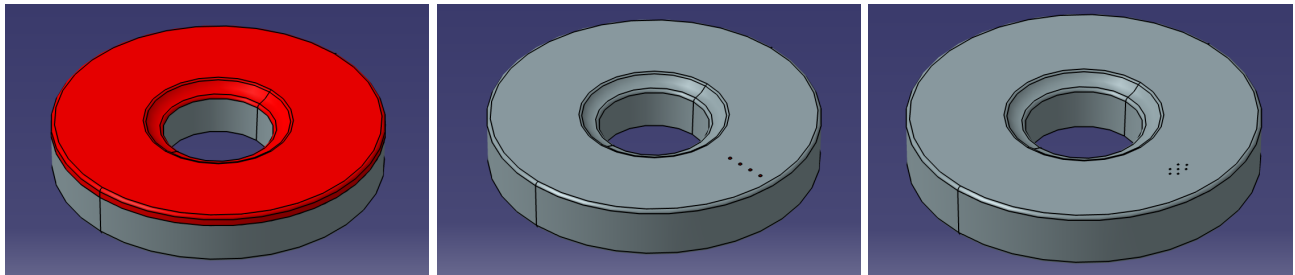
Das Bauteil, in das die Fehler induziert werden, ist ein Schmiederohling, welcher zur Herstellung einer Steuerscheibe für eine Koaxial-Hydraulikpumpe genutzt wird. Das Material ist ein niedriglegierter Stahl. Der durchschnittliche Durchmesser beträgt 94 mm, die Höhe ist ca. 16,1 mm. In der ersten Aufspannung wird mit einer Zustellung von ca. 1,3 mm plangeschruppt, anschließend wird mit ca. 1,5 mm erneut plangeschruppt und zum Schluss ca. 0,2 mm geschlichtet. In der ersten Aufspannung werden so ca. 3 mm abgedreht (siehe Abbildung 4.1a, der Abtrag ist rot markiert). Die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Fehlernachbildungen werden so platziert, dass sie in dieser Aufspannung erfasst werden.

4.2 Hohlraum

Das Konzept für Hohlräume (Abbildung 4.1b) sieht vor, Bohrungen von der Vorderseite der Probe mit verschiedenen Durchmessern und Tiefen zu fertigen. So ist es möglich in großen Stückzahlen einfache Proben zu fertigen. Im Rahmen des Projekts wurden 3 verschiedene Hohlraumproben für dieses Konzept erdacht. Die erste Probe besitzt Bohrungen mit einem Durchmesser von 1 mm, die zweite Probe mit einem Durchmesser von 0,5 mm. In beiden Proben sind die Bohrungen 1 mm, 2 mm, 3 mm und 4 mm tief. Die verschiedenen Tiefen simulieren verschiedene Hohlraumvolumina. Zusätzlich wurde eine dritte Probe erdacht, die ein Hohlraumnest (Abbildung 4.1c) darstellt. Hier sind mehrere Bohrungen mit 0,5 mm Durchmesser dicht beieinander gesetzt.

4.3 Einschluss

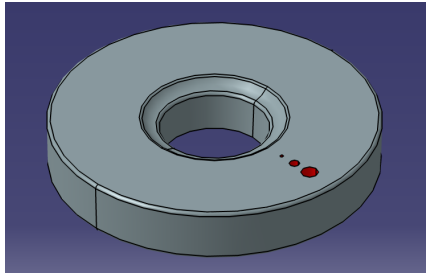
Einschlüsse weisen eine lokale Härteänderung relativ zum Ausgangsmaterial auf. Für die nachfolgende Modellierung werden Abmaße von 1 bis 5 mm im Durchmesser bei einer positiven oder negativen Härteänderung definiert. Das folgende Konzept (Abbildung 4.1d) sieht vor, Einschlüsse als Bohrungen mit eingepresstem Rundmaterial darzustellen. Dies ist technisch leicht umzusetzen und bietet eine große Auswahl an realisierbaren Härtegraden. Durch gesicherte Materialeigenschaften des Rohmaterials ist eine hohe Reproduzierbarkeit möglich. Wegen der einfachen Beschaffung als Normteil werden für die Einschlüsse geringerer Härte ungehärtete Zylinderstifte aus Stahl nach DIN EN ISO 2338 eingesetzt. Als härterer Einschluss werden Zylinderstifte nach DIN EN ISO 8734 aus Stahl gewählt, die ca. doppelt so hart wie das Rohmaterial sind. Als Bohrungsdurchmesser werden 1H7, 3H7 und 5H7 gewählt, mit den Durchmessern 1m6, 3m6 und 5m6 der Zylinderstifte ergeben sich so Übergangspassungen.



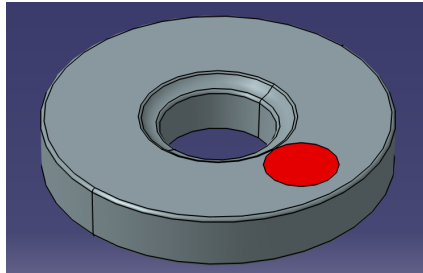
(a) Darstellung des Schmiederohlings mit abzutragender Fläche (rot)

(b) Einzelne Hohlräume über den Querschnitt

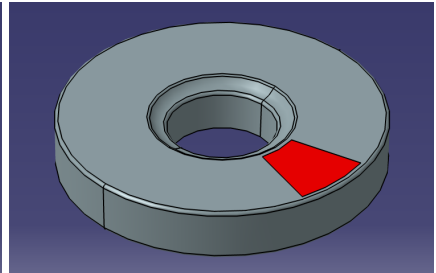
(c) Hohlraumnest



(d) Einschluss



(e) Materialtrennung. Einsatz (rot) besteht aus gleichem Material



(f) Festigkeitsänderung. Zone der Festigkeitsänderung in rot

Abbildung 4.1 – CAD-Modelle der verschiedenen Proben

4.4 Materialtrennung

Die Proben zur Nachbildung der Materialtrennung (Abbildung 4.1e) sollten einen flächigen bzw. ebenen Riss aufweisen und an der Rissstelle keinen Gefügezusammenhang besitzen. Die Breite des Risses sollte im Bereich 0-100 μm liegen und eine Tiefe von 5 mm aufweisen um bei der Zerspanung erfasst zu werden. Das Probenkonzept sieht vor, in den Rohling einen Einsatz aus dem gleichen Material einzufügen. Der Einsatz weist an seinen Enden eine Spielpassung und eine Presspassung auf. Die Presspassung fixiert den Einsatz in der Bohrung. Durch die Spielpassung entsteht ein Spalt zwischen Bohrung und Einsatz. In der Wahl der Spielpassung kann die Breite des Risses variiert werden.

4.5 Festigkeitsänderung

Ein auftretendes Fehlerbild sind Festigkeits- oder Härteunterschiede im Rohmaterial. Die Hauptmerkmale sind ein nicht mechanisch unterbrochener Stoffzusammenhalt und das gleiche Grundmaterial. Das Konzept (Abbildung 4.1f) sieht vor, die lokale Wärmebehandlung mittels eines Brenners durchzuführen. Vorteilhaft ist, dass das Grundmaterial dasselbe ist und die Wärmebehandlung inklusive Temperaturgradienten abgebildet werden kann. Die Einfachheit dieser Herstellungsmethode weist jedoch eine schlechte Reproduzierbarkeit auf, aufgrund der eingeschränkten Kontrollmöglichkeiten der Prozessparameter.

5 Versuchsdurchführung und -auswertung

Die Durchführung der Versuche erfolgte an einem Drehbearbeitungszentrum in fünf Messrunden. Zur Verringerung von Messabweichungen, verursacht beispielsweise durch Schneidenverschleiß, wurden zu Beginn jeder Runde zwei unbearbeitete Werkstücke zerspannt. Darauf folgten bis zu vier Teile mit induzierten Werkstückfehlern.

Für jede Probe wurden 20 Messparameter, sogenannte Sercos-Parameter, durch das Drehbearbeitungszentrum aufgenommen. Die Rohdaten werden von der Maschinensteuerung Bosch Rexroth IndraMotion MTX im Tabellenformat erzeugt und abgespeichert. Die Maschinenbefehle werden im Microsoft EXCEL-Format XLS, die Messdaten jeweils als separate CSV-Datei ausgegeben. Anschließend werden diese Daten in MATLAB importiert, relevante Teile herausgefiltert, bearbeitet und als Graphen ausgegeben (siehe Abb. 5.1). Die Auswertung erfolgt im Vergleich der Plots eines zuvor zerspannten Gutteils mit denen einer

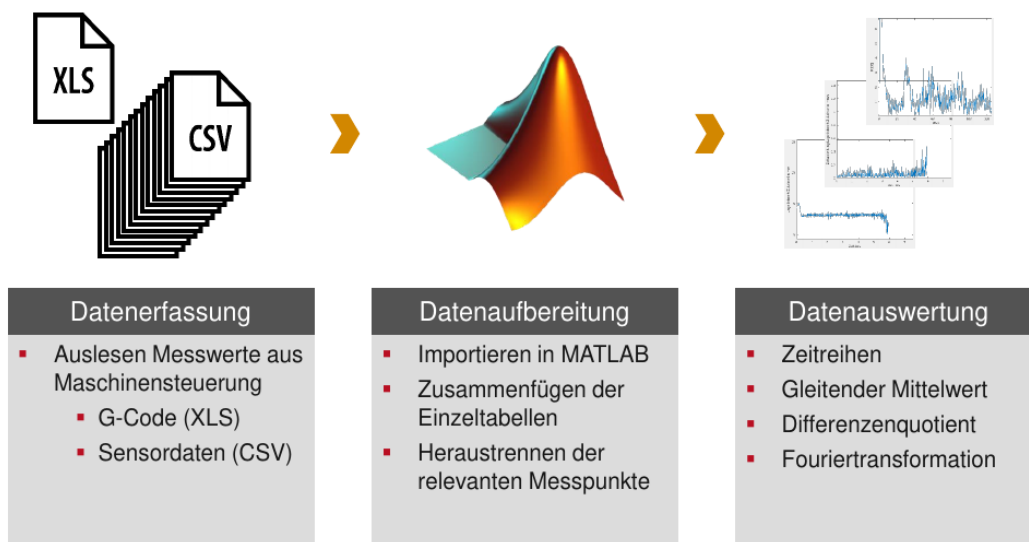


Abbildung 5.1 – Import und Verarbeitung der Versuchsdaten

Bildquelle Mitte: [51]

modifizierten Probe. Beispielhaft ist in Abbildung 5.2 eine Auswahl aus Zeitreihe, dem Absolutwert des Vorwärtsdifferenzenquotienten und der fouriertransformierten Darstellung im Frequenzraum abgebildet. In den ersten beiden Spalten der modifizierten Probe sind Start und Ende der Zeitabschnitte, in welchen die Fehlstelle durch das Zerspannungswerkzeug überfahren wird durch je eine senkrechte, rot strichlierte Linie gekennzeichnet. In den rot hinterlegten Bereichen sind deutliche Unterschiede im Werteverlauf der Modifizierten Probe gegenüber dem Gutteil ersichtlich. Im Frequenzbereich sind keine Änderungen in der Charakteristik des Signals ersichtlich.

Es folgt eine tabellarische Übersicht der Detektierbarkeit der einzelnen Fehlerbilder, aufgeschlüsselt in Sensoren und Auswertemethoden. Die 20 betrachteten Sercos-Parameter errechnen sich zum Teil auseinander und sind somit teilweise redundant. Dennoch kann sich ihre Eignung für die Detektion von

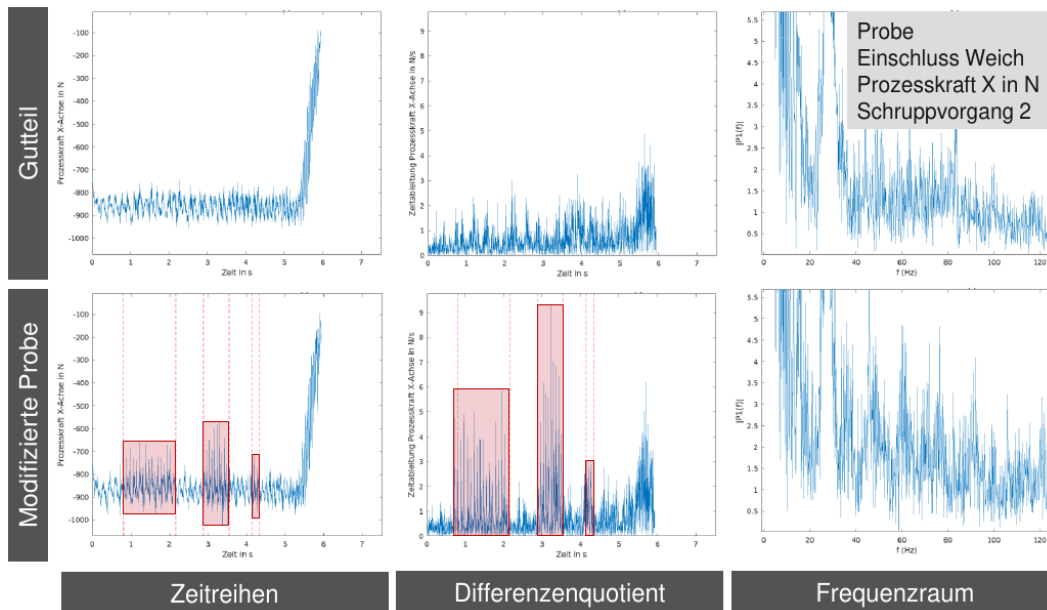


Abbildung 5.2 – Übersicht der verschiedenen Methoden zur Auswertung der Messdaten

Fehlern unterscheiden. Deshalb ist es das Ziel die am besten geeigneten Messparameter zu identifizieren. Im Falle eines Sichtbarwerdens der Fehlstelle wird die zugehörige Zelle farblich markiert und mit Zahlen gekennzeichnet. Diese geben Aufschluss darüber, ob ein Fehler im ersten (1) oder zweiten (2) Schrappdurchgang oder im Schlichtdurchgang (3) erkennbar ist.

1mm Hohlraum	Zeitreihe	FFT	Abs. Ableitung
Drehmoment (SC)	-	-	-
Drehmoment-Kraft (X)	1 2	-	1 2
Drehmoment-Kraft (Y)	-	-	-
Drehmoment-Kraft (Z)	1	-	1
Lage (X)	-	-	-
Lage (Y)	-	-	-
Lage (Z)	1 2	-	1 2
Phasenstrom U (SC)	-	-	-
Phasenstrom U (X)	-	-	1 2
Phasenstrom U (Y)	-	-	-
Phasenstrom U (Z)	-	-	-
Phasenstrom V (SC)	-	-	-
Phasenstrom V (X)	-	-	2
Phasenstrom V (Y)	-	-	-
Phasenstrom V (Z)	-	-	1
Prozessmoment-Kraft (X)	1 2	-	1 2
Prozessmoment-Kraft (Y)	-	-	-
Prozessmoment-Kraft (Z)	-	-	-
Zwischenkreisleistung (SC)	-	-	-
Zwischenkreisspannung (SC)	-	-	-

Tabelle 5.1 – Auswertung Probe Hohlraum 1 mm

0.5mm Hohlraum	Zeitreihe	FFT	Abs. Ableitung
Drehmoment (SC)	-	-	-
Drehmoment--Kraft (X)	-	-	-
Drehmoment--Kraft (Y)	-	-	-
Drehmoment--Kraft (Z)	-	-	-
Lage (X)	-	-	-
Lage (Y)	-	-	-
Lage (Z)	-	-	-
Phasenstrom U (SC)	-	-	-
Phasenstrom U (X)	-	-	-
Phasenstrom U (Y)	-	-	-
Phasenstrom U (Z)	-	-	-
Phasenstrom V (SC)	-	-	-
Phasenstrom V (X)	-	-	-
Phasenstrom V (Y)	-	-	-
Phasenstrom V (Z)	-	-	-
Prozessmoment-Kraft (X)	-	-	-
Prozessmoment-Kraft (Y)	-	-	-
Prozessmoment-Kraft (Z)	-	-	-
Zwischenkreisleistung (SC)	-	-	-
Zwischenkreisspannung (SC)	-	-	-

Tabelle 5.2 – Auswertung Probe Hohlraum 0,5 mm

Materialtrennung	Zeitreihe	FFT	Abs. Ableitung
Drehmoment (SC)	-	-	-
Drehmoment--Kraft (X)	2	-	1
Drehmoment--Kraft (Y)	-	-	-
Drehmoment--Kraft (Z)	2	-	-
Lage (X)	-	-	1 2
Lage (Y)	2	1 2	1
Lage (Z)	2	-	1
Phasenstrom U (SC)	-	-	-
Phasenstrom U (X)	-	-	1
Phasenstrom U (Y)	-	-	-
Phasenstrom U (Z)	-	-	2
Phasenstrom V (SC)	-	-	-
Phasenstrom V (X)	-	-	1
Phasenstrom V (Y)	-	-	-
Phasenstrom V (Z)	-	-	-
Prozessmoment-Kraft (X)	2	-	1
Prozessmoment-Kraft (Y)	-	-	-
Prozessmoment-Kraft (Z)	2	-	-
Zwischenkreisleistung (SC)	-	-	-
Zwischenkreisspannung (SC)	-	-	-

Tabelle 5.3 – Auswertung Probe Materialtrennung

Einschluss Weich	Zeitreihe	FFT	Abs. Ableitung
Drehmoment (SC)	-	-	-
Drehmoment--Kraft (X)	2	-	1 2
Drehmoment--Kraft (Y)	-	-	-
Drehmoment--Kraft (Z)	1 2	2	1 2
Lage (X)	-	-	2
Lage (Y)	2	-	2
Lage (Z)	1 2	2	1 2
Phasenstrom U (SC)	-	-	-
Phasenstrom U (X)	-	-	2
Phasenstrom U (Y)	-	-	-
Phasenstrom U (Z)	2	2	2
Phasenstrom V (SC)	-	-	-
Phasenstrom V (X)	-	-	2
Phasenstrom V (Y)	-	-	-
Phasenstrom V (Z)	-	-	-
Prozessmoment-Kraft (X)	2	-	1 2
Prozessmoment-Kraft (Y)	-	-	-
Prozessmoment-Kraft (Z)	1 2	2	2
Zwischenkreisleistung (SC)	-	-	-
Zwischenkreisspannung (SC)	-	-	-

Tabelle 5.4 – Auswertung Probe Einschluss Weich

Einschluss Hart	Zeitreihe	FFT	Abs. Ableitung
Drehmoment (SC)	2	-	-
Drehmoment--Kraft (X)	2	2	1 2
Drehmoment--Kraft (Y)	-	-	-
Drehmoment--Kraft (Z)	2	2	1 2
Lage (X)	-	-	2
Lage (Y)	2	-	-
Lage (Z)	1 2	2	1 2
Phasenstrom U (SC)	-	-	-
Phasenstrom U (X)	-	-	2
Phasenstrom U (Y)	-	-	-
Phasenstrom U (Z)	2	2	2
Phasenstrom V (SC)	-	-	-
Phasenstrom V (X)	-	2	1 2
Phasenstrom V (Y)	-	-	-
Phasenstrom V (Z)	-	-	1
Prozessmoment-Kraft (X)	2	2	1 2
Prozessmoment-Kraft (Y)	-	-	-
Prozessmoment-Kraft (Z)	2	2	1 2
Zwischenkreisleistung (SC)	2	-	-
Zwischenkreisspannung (SC)	-	-	-

Tabelle 5.5 – Auswertung Probe Einschluss Hart

Angelassen	Zeitreihe	FFT	Abs. Ableitung
Drehmoment (SC)	2	-	2
Drehmoment--Kraft (X)	1 2	1 2	1 2
Drehmoment--Kraft (Y)	1	-	-
Drehmoment--Kraft (Z)	1 2 3	1 2 3	1 2 3
Lage (X)	-	-	1 2
Lage (Y)	1 2 3	-	1 2 3
Lage (Z)	1 2 3	1 2 3	1 2 3
Phasenstrom U (SC)	-	-	-
Phasenstrom U (X)	1 2	1 2	1 2
Phasenstrom U (Y)	-	-	-
Phasenstrom U (Z)	2	2	2
Phasenstrom V (SC)	-	-	-
Phasenstrom V (X)	1 2	1 2	1 2
Phasenstrom V (Y)	-	-	-
Phasenstrom V (Z)	-	1 3	1
Prozessmoment-Kraft (X)	1 2 3	1 2	1 2 3
Prozessmoment-Kraft (Y)	-	-	-
Prozessmoment-Kraft (Z)	1 2 3	1 2 3	1 2 3
Zwischenkreisleistung (SC)	2	-	2
Zwischenkreisspannung (SC)	-	-	-

Tabelle 5.6 – Auswertung Probe Angelassen

Gehärtet	Zeitreihe	FFT	Abs. Ableitung
Drehmoment (SC)	1 2	1 2	1 2
Drehmoment--Kraft (X)	1 2	1 2	1 2
Drehmoment--Kraft (Y)	-	1 2	-
Drehmoment--Kraft (Z)	1 2 3	1 2 3	1 2 3
Lage (X)	-	-	1 2
Lage (Y)	1 2 3	1 2 3	1 2 3
Lage (Z)	1 2 3	1 2 3	1 2 3
Phasenstrom U (SC)	-	-	-
Phasenstrom U (X)	1 2	1 2	1 2
Phasenstrom U (Y)	-	1 2 3	1 2
Phasenstrom U (Z)	2	2	2
Phasenstrom V (SC)	-	-	-
Phasenstrom V (X)	1 2	1 2	1 2
Phasenstrom V (Y)	-	1 2	-
Phasenstrom V (Z)	1	1 2	1
Prozessmoment-Kraft (X)	1 2 3	1 2	1 2 3
Prozessmoment-Kraft (Y)	-	1 2 3	-
Prozessmoment-Kraft (Z)	1 2 3	1 2 3	1 2 3
Zwischenkreisleistung (SC)	1 2	1 2	1 2
Zwischenkreisspannung (SC)	2	2	-

Tabelle 5.7 – Auswertung Probe Gehärtet

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Veröffentlichung wurden zunächst relevante Quellen zu den unterschiedlichsten Bauteilfehlern der Vorprozesse, aber auch der Zerspanung selbst, zusammengetragen und analysiert. Nachfolgend wurden die relevantesten Fehler anhand ähnlicher geometrischer und physikalischer Eigenschaften in vier Oberkategorien eingeteilt:

- Hohlräume,
- Einschlüsse von Fremdmaterial,
- Materialtrennungen und
- Festigkeitsänderungen.

Zu diesen vier Fehlerkategorien wurden Proben gefertigt. Eine eindeutige geometrische Bestimmung der Fehlerbilder war jedoch aufgrund der enormen Vielfalt der Fehler in Größe, Form und Erscheinungsbild nicht möglich. Deshalb wurden Annahmen getroffen um einerseits die Fertigbarkeit und andererseits aber auch eine realitätsnahe Nachbildung der Fehler zu berücksichtigen

Die gefertigten Proben wurden dann im Wechsel mit unbeschädigten Gutteilen in einem drehenden Zerspanungsprozess bearbeitet. Dabei wurden 20 achsenbezogene Sercos-Parameter im 4 ms-Takt aufgezeichnet. Anschließend wurden die Sercos-Daten auf die für die Erkennung der Fehlstellen relevanten Bearbeitungsschritte hin untersucht. Dazu wurden die Daten von fehlerbehafteten Proben mit Gutteilen verglichen. Die Daten wurden auf drei Arten untersucht: Es wurde die Zeitreihe, der Absolutwert des Vorwärtsdifferentquotienten über der Zeit und das transformierte Signal im Frequenzbereich mittels FFT ausgewertet.

Dabei ergab sich, dass Hohlräume, harte und weiche Einschlüsse, Materialtrennungen und Festigkeitsänderungen grundsätzlich detektierbar sind. Die Genauigkeit der Detektion ist jedoch stark von der Abtastfrequenz abhängig: Für kleine Fehler (z. B. Hohlräume kleiner 0,5 mm) ist eine Abtastfrequenz von 4 ms, zumindest bei dem hier angewandten optischen Vergleich, nicht ausreichend. Weiterhin kann die Anzahl an Sercos-Parametern für eine Detektion reduziert werden, da einige Parameter sensibler oder deutlicher auf Fehlstellen reagieren, während andere kaum oder gar nicht reagieren.

Um die Genauigkeit der Fehlerdetektion und damit die Aussage zur Qualität der Werkstücke zu erhöhen, soll in der weiteren Forschung die Abtastfrequenz erhöht werden. Dadurch können kleinere und damit realitätsnähere Fehler untersucht werden. Dafür ist es jedoch von großer Bedeutung die Anzahl an Sercos-Parametern auf ein notwendiges Maß zu reduzieren, um nicht unnötige Datenmengen zu erzeugen und die Aufzeichnung zu vereinfachen. Weiterhin gestaltet sich die manuelle Auswertung der Daten bzw. Detektion der Fehlstellen aufgrund der riesigen Datenmengen als sehr aufwendig und damit auch als fehleranfällig. In Zukunft können weitere Potenziale durch eine stärker automatisierte Auswertung und Detektion erreicht und ausgeschöpft werden. Auch die Sensibilität der Fehlererkennung sollte mithilfe automatisierter Verfahren verbessert werden können.

Literatur

- [1] **E. Abele:** *ETA-Fabrik*. Hrsg. von E. Abele. URL: <http://www.eta-fabrik.de/> (besucht am 01.11.2017).
- [2] **E. Abele et al.:** „ETA Learning Factory: A Holistic Concept for Teaching Energy Efficiency in Production“. In: *Procedia CIRP* 54 (2016), S. 83–88.
- [3] **E. Abele et al.:** „Learning Factories for Research, Education, and Training“. In: *Procedia CIRP* 32 (2015), S. 1–6.
- [4] **ASM Commitee:** *Failure analysis and prevention*. 2. print. 1988.
- [5] **J. Baier:** *Handbuch der Gussfehler: Formsandbeeinflußbare Fehler und deren Vermeidung*. 3. Aufl. IKO-Erbslöh GmbH, 2005.
- [6] **H.-J. Bargel; G. Schulze:** *Werkstoffkunde*. 12., bearb. Aufl. 2016, Korr. Nachdruck 2016. Springer-Lehrbuch. Berlin und s.l.: Springer Berlin, 2012.
- [7] **P. Beiss:** *Pulvermetallurgische Fertigungstechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, Imprint und Springer Vieweg, 2013.
- [8] **W. Bergmann:** *Werkstofftechnik 2: Teil 2: Anwendung*. 4. Aufl. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2009.
- [9] **Bosch Rexroth AG:** *Rexroth IndraDrive Drive Controllers MPx-02; MPx-03; MPx-04: Parameter Description*. Hrsg. von Bosch Rexroth AG. URL: https://www.boschrexroth.com/country_units/america/united_states/sub_websites/brus_dcc/documentation_downloads/ProductDocumentation/CurrentProducts/Drives/IndraDrive/firmware/MPx03/MPx_03VRS_PA03.pdf (besucht am 13.12.2017).
- [10] **J. Bretschneider:** *Schweißen und Schweißnahtfehler*. 4.12.2013. URL: <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifww/wpc/ressourcen/dateien/schweissnaehte?lang=de> (besucht am 15.11.2017).
- [11] **J. Broichhausen:** *Schadenskunde: Analyse und Vermeidung von Schäden in Konstruktion, Fertigung und Betrieb*. München: Carl Hanser Verlag, 1985.
- [12] **A. Bührig-Polaczek et al.:** *Handbuch Urformen*. 1. Aufl. Handbuch der Fertigungstechnik. München: Hanser, 2013.

-
- [13] **A. Bührig-Polaczek et al.:** *Handbuch Urformen*. 2., vollständig neu bearbeitete Auflage. Edition Handbuch der Fertigungstechnik. München: Hanser, 2014.
- [14] **J. Campbell:** *Complete casting handbook: Metal casting processes, metallurgy, techniques and design*. 1st ed. Oxford UK und Waltham MA: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2011.
- [15] **Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH & Co. KG:** *Nitrodur: WERKSTOFFDATENBLATT 8CrMo16 1.8524*. Hrsg. von Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH & Co. KG. URL: http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/Baustahl/1.8524_de.pdf (besucht am 11.12.2017).
- [16] **U. Dillthey:** *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [17] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.:** *Eisenwerkstoffe – Wärmebehandlung – Begriffe (ISO 4885:2017); Deutsche Fassung EN ISO 4885:2017*. Berlin, 2017-07.
- [18] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.:** *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung (DIN 8580:2003-09)*. Berlin, 2003-09.
- [19] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.:** *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf (ISO 1101:2017); Deutsche Fassung EN ISO 1101:2017*. Berlin, 2017-09.
- [20] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.:** *Gestaltabweichungen (DIN 4760:1982-06)*. Berlin, 1982-06.
- [21] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.:** *Metallische Werkstoffe – Umwertung von Härtewerten (ISO 18265:2013); Deutsche Fassung EN ISO 18265:2013*. Berlin, 2014-02.
- [22] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.:** *Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten (ISO 5817:2014); Deutsche Fassung EN ISO 5817:2014*. Berlin, 2014-06.
- [23] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.:** *Schweißen und verwandte Prozesse – Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen – Teil 1: Schmelzschweißen (ISO 6520-1:2007); Dreisprachige Fassung EN ISO 6520-1:2007*. Berlin, 2007-11.
- [24] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.:** *Zylinderstifte aus gehärtetem Stahl und martensitischem nichtrostendem Stahl (ISO 8734 : 1997) Deutsche Fassung EN ISO 8734 : 1997*. Berlin, 1998-03.
- [25] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.:** *Zylinderstifte aus ungehärtetem Stahl und austenitischem nichtrostendem Stahl (ISO 2338:1997) Deutsche Fassung EN ISO 2338 : 1997*. Berlin, 1998-02.
- [26] **E. Doege; B.-A. Behrens:** *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*. 2. Aufl. VDI-Buch. s.l.: Springer-Verlag, 2010.

-
- [27] **Dr.-Ing. Dieter Liedtke, Dr.-Ing. Hansjürg Stiele:** *Merkblatt 236 Wärmebehandlung von Stahl*. Hrsg. von Wirtschaftsvereinigung Stahl. Düsseldorf, 2009.
- [28] **A. H. Fritz:** *Fertigungstechnik*. 11., neu bearb. und erg. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer Vieweg, 2015.
- [29] **Goodfellow:** *Kupfer Materialinformationen*. URL: <http://www.goodfellow.com/G/Kupfer.html> (besucht am 31. 10. 2017).
- [30] **Goodfellow:** *Wolfram Materialinformationen*. URL: <http://www.goodfellow.com/G/Wolfram.html> (besucht am 31. 10. 2017).
- [31] **S. Hasse:** *Guß- und Gefügefehler: Erkennung, Deutung und Vermeidung von Guß- und Gefügefehlern bei der Erzeugung von gegossenen Komponenten*. 2., aktualisierte u. erweiterte Aufl. Berlin: Schiele und Schön, 2003.
- [32] **H. Hoffmann et al.:** *Handbuch Umformen*. 2., vollständig neu bearbeitete Auflage. Edition Handbuch der Fertigungstechnik. München: Hanser, 2012.
- [33] **B. Ilchner; R. F. Singer:** *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik: Eigenschaften, Vorgänge, Technologien*. 5., neu bearbeitete Auflage. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [34] **L. A. Jackman et al.:** „White Spots in Superalloys“. In: *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*. Hrsg. von The Minerals, Metals & Materials Society. 1994, S. 153–166.
- [35] **S. Kalpakjian et al.:** *Werkstofftechnik*. München: Pearson Studium ein Imprint der Pearson Education, 2010.
- [36] **F. Klocke:** *Fertigungsverfahren 5*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [37] **F. Klocke; W. König:** *Fertigungsverfahren*. Berlin und New York: Springer, 2005.
- [38] **F. Klocke; W. König:** *Fertigungsverfahren 4: Umformen*. 5., neu bearbeitete Auflage. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [39] **R. Koether; A. Sauer:** *Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure: Mit 406 Bildern und 41 Tabellen sowie 30 Übungsaufgaben und 53 Kontrollfragen*. 5., überarbeitete und erweiterte Auflage unter Mitarbeit von Dirk Odening. München: Hanser, 2017.
- [40] **M. Lalpoor et al.:** „Fracture behavior and mechanical properties of high strength aluminum alloys in the as-cast condition“. In: *Materials Science and Engineering: A* 497.1-2 (2008), S. 186–194.
- [41] **G. Lange; M. Pohl:** *Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle*. 6. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2014.

-
- [42] **V. Läßle:** *Werkstofftechnik Maschinenbau: Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen*. 3., aktualisierte Aufl. Bibliothek des technischen Wissens. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer, 2011.
- [43] **D. Liedtke:** *Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen*. 9., neu bearb. und erw. Aufl. Bd. 349. Kontakt & Studium. Renningen: expert-Verl., 2014.
- [44] **C. Monroe; C. Beckermann:** „Development of a hot tear indicator for steel castings“. In: *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing - MATER SCI ENG A-STRUCT MATER* 413 (2005), S. 30–36.
- [45] **Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG) Geometrische Produktspezifikation und -prüfung:** *DIN 8582 - Fertigungsverfahren Umformen*. September 2003.
- [46] **E. Roos; K. Maile:** *Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. 4. bearb. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [47] **A. Rossmann:** „Band 3, Teil A: Halbzeug, Rohteile: Entwicklung, Erprobung, Zulassung. Schäden und Probleme: Werkstofffehler. Verfahren: Gießen, Schmieden und Heißisostatisches Pressen (HIP). Vorbeugende Maßnahmen und Abhilfen.“ In: *Probleme der Maschinenelemente erkennen, verhüten und lösen* (2012).
- [48] **J. Ruge; H. Wohlfahrt:** *Technologie der Werkstoffe: Herstellung, Verarbeitung, Einsatz ; mit 62 Tabellen*. 9., überarb. und aktualisierte Aufl. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [49] **G. Schulze:** *Die Metallurgie des Schweißens: Eisenwerkstoffe - nichteisenmetallische Werkstoffe*. 4., neu bearbeitete Aufl. VDI-Buch. Heidelberg und New York: Springer, 2010.
- [50] **The MathWorks Inc:** *Fourier Transforms - MATLAB & Simulink - MathWorks Deutschland*.
- [51] **The MathWorks Inc:** *The Mathworks Logo*. URL: <https://de.mathworks.com/> (besucht am 02.02.2018).
- [52] The Minerals, Metals & Materials Society, Hrsg.: *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*. 1994.
- [53] **H. Tschätsch; J. Dietrich:** *Praxis der Umformtechnik: Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge*. 10., überarb. und erw. Aufl. Praxis. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
- [54] **H. Worch:** *Werkstoffwissenschaft*. 10., vollst. überarb. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2011.